

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie mécanique

# DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODOLOGIES DE CONCEPTION ET VALIDATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS ET COMPOSANTS STRUCTURAUX

Thèse de doctorat  
Spécialité : génie mécanique

Cristian IORGA Ing., MSc.

|        |                  |  |
|--------|------------------|--|
| Jury : | Alain Desrochers | Prof., Ing., PhD. (Université de Sherbrooke) |
|        | Ahmed Maslouhi   | Prof., Ing., PhD. (Université de Sherbrooke) |
|        | Patrik Doucet    | Prof., Ing., PhD. (Université de Sherbrooke) |
|        | Cécile Smeesters | Prof., Ing., PhD. (Université de Sherbrooke) |
|        | Michel Guillot   | Prof., Ing., PhD. (Université Laval)         |



# RÉSUMÉ

Le présent projet de recherche est dédié à la formalisation et à l'intégration des méthodologies de conception et validation à la phase de conception détaillée, afin de favoriser les échanges de connaissances entre les acteurs impliqués dans le processus de développement de produits. La conception détaillée implique des interactions entre trois éléments : la géométrie, les matériaux et les chargements. Conséquemment, dans le cadre de cette thèse qui intègre plusieurs articles, les liens entre ces trois éléments seront formalisés au niveau des méthodologies de conception. Plus spécifiquement, les méthodologies de conception proposées seront centrées sur la phase de conception détaillée. En effet, dans la littérature existante, peu d'articles s'attardent à décrire les processus itératifs selon lesquels un concept est développé en produit dans le respect des critères de conception mentionnés dans le cahier de charges et tout en gardant le lien avec les connaissances disciplinaires et les outils d'assistance actuels.

Il faudra donc envisager des méthodologies de conception détaillée qui cibleront plusieurs critères de conception et qui s'adapteront à divers types de produits. À l'étape de conception détaillée, dans le cadre du processus de développement de produits, il faudra également intégrer l'optimisation et la validation de produits. Les activités d'optimisation permettent de trouver une ou plusieurs combinaisons de paramètres maximisant ou minimisant un critère de conception donné, tandis que les activités de validation fournissent une rétroaction au concepteur, afin de vérifier l'exactitude des calculs réalisés et l'atteinte de tous les critères de conception.

L'application d'une décomposition des étapes représente une stratégie qui sera utilisée pour le développement de méthodologies de conception et de validation de produits. Les sous-étapes qui en résulteront seront plus faciles à accomplir et à gérer. Qui plus est, les sous-étapes peuvent interagir entre elles, donc les concepteurs doivent s'assurer que la solution obtenue suite à une étape ne viole pas les hypothèses ou les contraintes d'une autre sous-étape complémentaire.

La méthodologie de conception et de validation de produits structuraux, qui en a résulté suite à ce programme de recherche, a été appliquée en milieu industriel dans le but de prouver sa contribution au développement de ce type des produits. Un des gains les plus importants

apportés par cette méthodologie c'est qu'on a réussi à réduire le nombre d'itérations au niveau de l'étape de validation expérimentale tout en assurant la rétroaction sur les besoins du client et sur les spécifications du produit. Cette réduction du nombre d'itération au niveau de la validation expérimentale sera transposée également dans une réduction du temps de validation.

Finalement, suite à l'application de la nouvelle approche méthodologique, on a été en mesure de développer une composante structurale qui devrait respecter plusieurs critères à la fois et de déterminer d'une manière scientifique sa durée de vie tout en minimisant son surdimensionnement.

**Mots-clés :** conception détaillée, validation, optimisation, critères de conception, types de produit



# REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce document ont été réalisés en deux phases. Ainsi, pour une première période de deux ans, j'ai étudié dans le cadre du laboratoire LIMAO (Laboratoire en Ingénierie Mécanique Assistée par Ordinateur) du département de génie mécanique à la faculté de génie de l'Université de Sherbrooke où j'ai développé une méthodologie générale de conception et de validation pour les pièces structurales. La deuxième période de mon programme de doctorat s'est passée au CTA (Centre de Technologies Avancées) où j'ai eu l'occasion de mettre en œuvre les approches théoriques acquises et développées durant la première période du programme.

Je remercie tout d'abord Alain Desrochers qui m'a confié cette thématique de recherche enrichissante, pour son encadrement, pour sa disponibilité et pour ses conseils tout au long de ces années. Son expertise scientifique, les lignes directrices que j'ai reçues de sa part et son appui m'ont permis de faire avancer le projet et de m'améliorer professionnellement.

Je remercie Patrik Doucet et Cécile Smeesters (professeurs au département de génie mécanique à l'UdeS) pour m'avoir offert la chance et le privilège de côtoyer quatre promotions d'étudiants en génie mécanique en tant que chargé d'exercices dirigés dans le cadre du cours IMC156 (Méthodologies de conception). Cette expérience m'a appris la complexité, la beauté et la valeur du travail d'enseignant.

Je remercie Patrick Quirion (ingénieur et chef de projet au CTA) pour son accueil et pour son aide logistique au sein de l'équipe APC-Automotive Partnership Canada.

Je remercie tous mes collègues (des gens extraordinaires) avec qui j'ai travaillé tout au long de cette période et qui m'ont permis d'apprendre beaucoup et d'apprécier chaque jour passé au centre de recherche.

Mes derniers, mais pas les moindres remerciements, vont à Silvia-Ana et Cristian-Alexandru qui ont toujours été à mes côtés dans les moments plus difficiles et, plus souvent, dans les moments merveilleux vécus ensemble. Vous avez été la raison pour laquelle je n'ai jamais lâché, même si parfois les défis étaient difficiles à atteindre. Je vous remercie énormément parce que vous faites partie de ma vie, pour votre support durant toutes ces années et parce que vous avez fait de moi un meilleur époux et un meilleur papa.

# TABLE DES MATIÈRES

|   |      |
|---|------|
| RÉSUMÉ.....   | i    |
| REMERCIEMENTS.....  | iii  |
| TABLE DES MATIÈRES .....  | iv   |
| LISTE DES FIGURES.....  | vi   |
| LISTE DES TABLEAUX.....   | x    |
| LEXIQUE.....  | xi   |
| LISTE DES SYMBOLES .....  | xii  |
| LISTE DES ACRONYMES .....   | xiii |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....   | 1    |
| 1.1 Mise en contexte et problématique.....  | 1    |
| 1.2 Définition et objectifs du projet de recherche .....                                  | 2    |
| 1.2.1 Question de recherche .....   | 3    |
| 1.2.2 Hypothèses .....  | 3    |
| 1.2.3 Objectifs .....   | 3    |
| 1.3 Contributions originales .....  | 7    |
| 1.4 Plan du document .....  | 9    |
| CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART .....  | 13   |
| 2.1 Processus de Conception versus Processus de Développement de Produits.....            | 13   |
| 2.2 Critères de conception : Éléments du CdCF et des Notes à la conception (article_1)... | 20   |
| 2.3 Optimisation dans le cadre du PDP .....   | 33   |
| 2.4 Conception pour « X » .....   | 37   |
| 2.4.1 Conception pour la fabrication .....  | 37   |
| 2.4.2 Conception pour l'assemblage .....  | 41   |
| 2.4.3 Conception pour l'environnement.....  | 43   |
| 2.5 Validation de produits .....  | 46   |
| 2.6 Validation en fatigue des pièces structurales .....                                   | 49   |
| 2.7 Validation des procédés de fabrication .....  | 54   |
| CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ET VALIDATION DE PRODUITS                           | 63   |
| 3.1. Formalisation des méthodes de conception et de validation .....                      | 63   |
| 3.1.1 Types de critères de conception ou de spécifications de produits.....               | 64   |
| 3.1.2 Types de produits .....   | 65   |
| 3.1.3 Types de méthodes de conception et validation.....                                  | 68   |
| 3.2. Algorithme intégré de conception .....   | 70   |
| 3.2.1. Calculs des chargements .....  | 72   |
| 3.2.2. Analyse des critères de conception (article 2).....                                | 72   |
| 3.2.3. Validation des produits (article 3).....   | 88   |
| CHAPITRE 4 ANALYSE ET VALIDATION DE L'APPROCHE .....                                      | 109  |
| 4.1 Validation en milieu académique .....   | 109  |
| 4.2 Validation en milieu industriel .....   | 110  |
| 4.2.1. Développement d'un nouveau châssis pour un produit récréatif .....                 | 111  |
| 4.2.2. Identification des chargements.....  | 112  |
| 4.2.3. Conception préliminaire et analyse des critères .....                              | 117  |
| 4.2.4. Validation numérique .....   | 122  |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.4.1 Validation numérique statique AÉF1 (N1a).....  | 122 |
| 4.2.4.2 Validation numérique en fatigue AÉF2 (N2a) .....   | 127 |
| 4.2.5. Validation expérimentale.....   | 138 |
| 4.2.6. Validation physique.....  | 146 |
| 4.3 Optimisation des composantes structurales périphériques .....  | 148 |
| CHAPITRE 5 CONCLUSION.....   | 151 |
| 5.1 Contributions de l'approche dans les domaines académique et industriel .....   | 151 |
| 5.2 Perspectives de recherche dans le domaine des méthodologies de conception et de validation de produits .....   | 153 |
| ANNEXE A : .....   | 155 |
| Élaboration des procédures spécifiques de validation de produits.....  | 155 |
| i. Pilotage manuel de la machine d'essais .....  | 155 |
| ii. Essai à partir du <i>Basic TestWare</i> .....  | 156 |
| iii. Essai à partir du <i>MultiPurpose TestWare</i> .....  | 157 |
| ANNEXE B : .....   | 169 |
| Approche relative de validation en fatigue du sous-système châssis .....   | 169 |
| ANNEXE C : .....   | 174 |
| Points de contrôle pour le cyclage du châssis de référence.....  | 174 |
| ANNEXE D: 178  |     |
| Outils mis en place et paramètres identifiés et utilisés pour calculer la contrainte équivalente dans le point de contrôle suite aux tests physiques ..... | 178 |
| ANNEXE E: Article 4 .....  | 186 |
| ANNEXE F: Article 5 .....  | 207 |
| LISTE DES RÉFÉRENCES.....  | 229 |

# LISTE DES FIGURES

|  |     |
|--|-----|
| Figure 1: Les relations entre les étapes de conception et les actions prises pendant ce processus [1] .....                      | 15  |
| Figure 2: Matrice des étapes par phases dans le processus de conception de produits [traduit de 2].....                          | 16  |
| Figure 3: Le Processus de Conception, partie intégrante du PDP [traduit de 1].....   | 17  |
| Figure 4: L'ingénierie séquentielle vs. L'ingénierie simultanée [tiré de 9].....   | 18  |
| Figure 5: General methodology for the design engineering process.....  | 29  |
| Figure 6: Schéma d'intégration des outils de conception pour l'environnement dans le PDP à l'UdeS [tiré de 9].....               | 44  |
| Figure 7: Chaise POÄNG, développée par IKEA [9] .....  | 45  |
| Figure 8: Validation dans deux contextes différents : numérique et physique [38].....  | 48  |
| Figure 9: Types de chargements cycliques [60].....   | 51  |
| Figure 10: Illustration graphique de plusieurs spectres de chargements dans le cas de la loi de Palmgren-Miner [40, 41, 60]..... | 52  |
| Figure 11: Schéma de principe de l'hydroformage.....   | 54  |
| Figure 12: Schéma de principe de l'extrusion .....   | 55  |
| Figure 13: Schéma de principe de l'étirage .....   | 57  |
| Figure 14: Schéma de principe du pliage .....  | 58  |
| Figure 15: Diagramme de flux d'activités à l'étape de conception détaillée pour un nouveau produit .....                         | 71  |
| Figure 16: Evaluation and Validation steps at the detailed design phase (adapted after [38]) .                                   | 92  |
| Figure 17: Generic cost breakdown structure [7].....   | 95  |
| Figure 18: Engineering V-Chart [7].....  | 96  |
| Figure 19: Example of decision making matrix in terms of qualitative design criteria .....                                       | 97  |
| Figure 20: Integration of evaluation/validation stage in the NDP .....   | 99  |
| Figure 21: Méthodologie générale de conception et validation de la fiabilité des pièces structurales .....                       | 103 |
| Figure 22: Exemple d'une estimation de la contrainte équivalente pour les tests accélérés [60] .....                             | 104 |
| Figure 23: Synthèse du PDP proposé pour l'industrie des produits récréatifs .....  | 106 |
| Figure 24: Maquette du Roadster à trois roues .....  | 110 |
| Figure 25: Diagramme du corps libre (DCL) pour le calcul des chargements en virage.....  | 114 |
| Figure 26: Le châssis du Roadster tricycle RS (existant).....  | 118 |
| Figure 27: Ensemble châssis PROTOTYPE P_0,5 optimisé aluminium [61] .....  | 118 |
| Figure 28: Ensemble châssis PROTOTYPE P_0,5 optimisé acier [61].....   | 119 |
| Figure 29: Nouveau concept de châssis 3D en acier [61] .....   | 120 |
| Figure 30: Nouveau concept de châssis 3D en aluminium [61].....  | 120 |
| Figure 31: Assemblage/Désassemblage des sous-systèmes moteurs et batteries [61].....   | 122 |
| Figure 32: Simulation AÉF1 pour le châssis 3D-acier [61].....  | 123 |
| Figure 33: Simulation AÉF1 pour le châssis de référence .....  | 123 |
| Figure 34: La courbe S-N déterminée en fonction des facteurs qui influent sur la limite d'endurance.....                         | 125 |
| Figure 35: Montage ensemble châssis + gabarit de cyclage pour AÉF2 dans l'environnement CATIA.....                               | 128 |
| Figure 36: Simulation numérique du montage dans l'environnement ANSYS.....   | 129 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 37: Maquette numérique du montage sur la machine d'essais MTS, dans l'environnement ANSYS .....                                  | 130 |
| Figure 38: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné asymétrique (virage) .....   | 131 |
| Figure 39: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné symétrique (freinage) .....  | 132 |
| Figure 40: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné symétrique (freinage+dos d'âne) .....                              | 132 |
| Figure 41: Profilé rectangulaire choisi pour la barre brisée .....  | 133 |
| Figure 42: Fixation de la barre rigide entre les triangles supérieur et inférieur du sous-système suspension avant .....                | 134 |
| Figure 43: Fixation de la barre rigide entre le bras de suspension arrière et la poutre inférieure du châssis .....                     | 134 |
| Figure 44: Système d'attache moteur .....   | 135 |
| Figure 45: Système d'attache siège .....  | 136 |
| Figure 46: Calibration des jauges de contraintes installées aux points de mesure .....  | 139 |
| Figure 47: Fixation de la structure sur la machine de traction MTS à l'angle de 25 ° .....  | 140 |
| Figure 48: La courbe S-N optimisée et l'application de la loi de Miner .....  | 141 |
| Figure 49: Les courbes S-N en fonction des rapports de charges pour l'A1 2024-T4 [60] .....   | 143 |
| Figure 50: Zone de rupture .....  | 143 |
| Figure 51: Comparaison de la zone de rupture avec les étapes AÉF1 et AÉF2 .....   | 144 |
| Figure 52: Processus global de développement des nouveaux véhicules récréatifs [28] .....   | 146 |
| Figure 53: Icône <i>Manual Command</i> .....  | 155 |
| Figure 54: Fenêtre du <i>Manual Command</i> .....   | 155 |
| Figure 55: Fenêtre <i>Test Setup</i> du <i>Basic TestWare</i> .....   | 156 |
| Figure 56: Fenêtre principale du programme <i>Basic TestWare</i> .....  | 157 |
| Figure 57: Interface du <i>Multi Purpose TestWare</i> .....   | 158 |
| Figure 58: Fenêtre du <i>MPT Options Editor</i> .....   | 158 |
| Figure 59: Fenêtre du <i>MPT Procedure Editor</i> .....   | 159 |
| Figure 60: Fenêtre pour créer des sous-procédures .....   | 160 |
| Figure 61: Procédure <i>Test_Traction</i> .....   | 160 |
| Figure 62: Onglet <i>Acquisition</i> de l'objet <i>Timed Acquisition</i> .....  | 161 |
| Figure 63: Onglet <i>Signals</i> de l'objet <i>Timed Acquisition</i> .....  | 161 |
| Figure 64: Onglet <i>Destination</i> de l'objet <i>Timed Acquisition</i> .....  | 161 |
| Figure 65: Onglet <i>Command</i> de l'objet <i>Segment Command</i> .....  | 162 |
| Figure 66: Onglet <i>Settings</i> de l'objet <i>Failure Detector</i> .....  | 162 |
| Figure 67: Procédure <i>Test_Fatigue</i> .....  | 163 |
| Figure 68: Onglet <i>Acquisition</i> de l'objet <i>Timed Acquisition</i> .....  | 163 |
| Figure 69: Onglet <i>Command</i> de l'objet <i>Cyclic Command</i> .....   | 164 |
| Figure 70: Onglet <i>Settings</i> de l'objet <i>Failure Detector</i> .....  | 164 |
| Figure 71: Signal complexe contrôlé par un fichier texte .....  | 165 |
| Figure 72: Ouverture de tous les fichiers dans Excel .....  | 166 |
| Figure 73: Importation d'un fichier .dat dans Excel .....   | 166 |
| Figure 74: Diagramme de Critères de Conception (sans cyclage) .....   | 167 |
| Figure 75: Diagramme de Critères de Conception (avec cyclage) .....   | 168 |
| Figure 76: Approche de validation relative (spectre de cyclage vertical) .....  | 169 |
| Figure 77: Variation de la force dans le spectre de cyclage vertical, effectué sur l'ensemble châssis RT (données de laboratoire) ..... | 169 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 78: Variation du déplacement dans le spectre de cyclage vertical, effectué sur l'ensemble châssis RT (donnée de laboratoire).....   | 170 |
| Figure 79: Approche de validation relative (spectre de cyclage latéral).....   | 170 |
| Figure 80: Variation des forces dans le spectre de cyclage latéral, effectué sur l'ensemble ..   | 171 |
| Figure 81: Variation des déplacements dans le spectre de cyclage latéral, effectué sur l'ensemble .....                                    | 171 |
| Figure 82: Approche de validation relative (spectre de cyclage en freinage).....   | 172 |
| Figure 83: Variation de la force dans le spectre de cyclage en freinage, effectué sur l'ensemble .....                                     | 172 |
| Figure 84: Variation du déplacement dans le spectre de cyclage en freinage, effectué sur l'ensemble .....                                  | 173 |
| Figure 85: Cas de freinage (global).....   | 174 |
| Figure 86: Cas de freinage + dos d'âne (châssis).....  | 174 |
| Figure 87: Cas de freinage + dos d'âne (bras de suspension arrière).....   | 175 |
| Figure 88: Cas de virage (global).....   | 175 |
| Figure 89: Cas de virage (châssis).....  | 176 |
| Figure 90: Cas de virage (bras de suspension arrière) .....  | 176 |
| Figure 91: Corrélation entre les étapes de simulation par éléments finis (cas de freinage)....   | 177 |
| Figure 92: Corrélation entre les étapes de simulation par éléments finis (cas de virage) .....   | 177 |
| Figure 93: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 3 .....  | 178 |
| Figure 94: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 4 (rosette droite) .....   | 178 |
| Figure 95: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 4 (rosette gauche) .....   | 179 |
| Figure 96: Le système d'acquisition des données instrumenté sur le véhicule de référence...  | 179 |
| Figure 97: Jauge de déformation type «rosette» utilisée à la validation des chargements sur le véhicule de référence.....                  | 180 |
| Figure 98: L'interface du logiciel TCE_v3.15, utilisé pour l'acquisition des données sur le véhicule de référence.....                     | 180 |
| Figure 99: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage aux points P7 .....  | 182 |
| Figure 100: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage aux points P8.....  | 182 |
| Figure 101: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage et un freinage aux points P7 (gauche) et P8 (droite)..... | 185 |
| Figure 102: Selection table of product design and validation methodologies .....   | 193 |
| Figure 103: Design and Validation Methodology for a New Product .....  | 198 |
| Figure 104: Generic Design and Validation Methodology based on an Evolution from an Existing Product .....                                 | 202 |
| Figure 105: Generic Design and Validation Methodology based on a Variant Design.....   | 203 |
| Figure 106: Design and validation methodology for the structural parts of a recreational vehicle [79].....                                 | 210 |
| Figure 107: Free-body diagram of the vehicle frame of reference .....  | 211 |
| Figure 108: Roadster planar frame concept [10].....  | 214 |
| Figure 109: S/N curve estimation for the ASTM 518 steel [80].....  | 217 |
| Figure 110: Finite element simulation of the frame with the actual loads (FEA1).....   | 218 |
| Figure 111: The mounting jig and frame on the testing machine (DMU) .....  | 219 |
| Figure 112: Finite element simulation of the frame on the testing machine (FEA2).....  | 220 |
| Figure 113: The mounting jig and frame on the tests machine (Physical prototype) .....   | 222 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 114: Fatigue parameters from the acquisition data system e-DAQ ..... | 223 |
|---|-----|

# LISTE DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1: Caractéristiques des plusieurs catégories de procédés de fabrication [33] .....   | 39  |
| Tableau 2: Sélection de méthodologies de conception et validation de produits.....   | 64  |
| Tableau 3: Dimensional optimisation of tubing size.....  | 84  |
| Tableau 4: Les points géométriques de référence pour le calcul des chargements du véhicule Roadster tricycle1 .....  | 112 |
| Tableau 5: Les points géométriques de référence pour le calcul des chargements du véhicule Roadster tricycle2.....   | 112 |
| Tableau 6: Forces et accélérations mesurées expérimentalement durant l'essai sur route pour l'analyse en fatigue du châssis.....   | 113 |
| Tableau 7: Résultats du calcul analytique correspondant aux cas de chargements sur route .   | 115 |
| Tableau 8: Nombre de cycles par type de chargement.....  | 115 |
| Tableau 9: Comparaison de quatre concepts de châssis [61] .....  | 121 |
| Tableau 10: Valeurs des contraintes et des déplacements calculés à l'étape AÉF1 aux points de contrôle sur le châssis de référence .....   | 126 |
| Tableau 11: Forces appliquées par la machine de traction en fonction du type d'essai .....   | 133 |
| Tableau 12: Contraintes et déplacements induits par les forces appliquées par la machine d'essais (résultats obtenus suite aux simulations par ÉF pour la durée de vie souhaitée : 425000 cycles)..... | 137 |
| Tableau 13: Contraintes et déplacements induits par les forces appliquées sur la machine d'essais (résultats obtenus suite aux simulations par ÉF pour les tests accélérés : 10000 cycles) .....       | 138 |
| Tableau 14: Facteurs de sécurité utilisés pour la conception du châssis.....   | 145 |
| Tableau 15: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un virage, pour la jauge installée dans le point de contrôle P7 .....  | 181 |
| Tableau 16: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un virage, pour la jauge installée dans le point de contrôle P8 .....  | 181 |
| Tableau 17: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un freinage, sur la jauge installée dans le point de contrôle P7 .....   | 183 |
| Tableau 18: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un freinage, pour la jauge installée dans le point de contrôle P8 .....  | 184 |
| Tableau 19: Typical load cases for a recreational vehicle .....  | 212 |
| Tableau 20: Lifetime estimation for a recreational product.....  | 213 |
| Tableau 21: Functional concepts comparison .....   | 215 |
| Tableau 22: Results of economic criteria analysis [10] .....   | 216 |
| Tableau 23: Results of the numerical simulation (FEA2) on the reference frame.....   | 221 |
| Tableau 24: Stress calculations results for the critical point P8, at different stages of the PDP .....  | 225 |



# LEXIQUE

| Terme         | Définition  |
|---------------|---|
| Formalisation | Détermination des règles suivant lesquels on formule et on raisonne dans le cadre d'une théorie ; |
| Intégration   | Coordination des activités permettant un fonctionnement harmonieux.                               |
| ...           | ...   |

# LISTE DES SYMBOLES

| Symbole                 | Définition   |
|-------------------------|--|
| $\gamma$                | Accélération   |
| $\tau$                  | Contrainte de cisaillement   |
| $\tau_{\max}$           | Contrainte de cisaillement maximale  |
| $\sigma_{\max}$         | Contrainte normale maximale  |
| $\sigma_{\min}$         | Contrainte normale minimale  |
| $\sigma_a$              | Contrainte alternée  |
| $\sigma_m$              | Contrainte moyenne   |
| $\sigma_{\text{éq-a}}$  | Contrainte équivalente alternée  |
| $\sigma_{\text{éq-m}}$  | Contrainte équivalente moyenne   |
| $\nu$                   | Coefficient de Poisson   |
| $\hat{\sigma}$          | Contrainte nominale  |
| $\sigma_{\text{éq-CR}}$ | Contrainte équivalente complètement renversée  |
| $\varepsilon$           | Déformation interne du matériau  |
| $\varepsilon_a$         | Déformation interne du matériau à $0^\circ$  |
| $\varepsilon_b$         | Déformation interne du matériau à $45^\circ$   |
| $\varepsilon_c$         | Déformation interne du matériau à $90^\circ$   |
| $\varepsilon_t$         | Déformation interne en cisaillement du matériau  |
| $\varepsilon_{\max}$    | Déformation interne maximale du matériau   |
| $\varepsilon_{\min}$    | Déformation interne minimale du matériau   |
| $\delta$                | Déflexion  |
| D                       | Diamètre extérieur   |
| d                       | Diamètre intérieur   |
| A                       | Élongation   |
| $n_d$                   | Facteur de sécurité  |
| R                       | Fiabilité  |
| $\theta$                | L'angle entre la direction de la déformation maximale $\varepsilon_{\max}$ (ou minimale) et la direction de la déformation mesurée $\varepsilon_a$ |
| $S_{ut}$                | La limite ultime du matériau   |
| $S_y$                   | La limite d'élasticité du matériau   |
| $S_e$                   | La limite élastique du matériau  |
| M                       | Masse  |
| E                       | Module d'élasticité  |
| $\hat{\sigma}_\sigma$   | La déviation standard de la contrainte nominale  |
| $\hat{\sigma}_S$        | Limite de résistance à la fatigue  |
| $\hat{\sigma}_S$        | La déviation standard de la limite de résistance à la fatigue  |
| $R_p$                   | Rayon de pliage  |
| $R_g$                   | Rayon de giration  |
| V                       | Vitesse  |
| ...                     | ...  |

# LISTE DES ACRONYMES

| Acronyme   | Définition   |
|------------|--|
| AÉF 1 et 2 | Analyses pas éléments finis (étapes 1 et 2)                                |
| PDP        | Processus de Développement de Produits                                     |
| NPD        | New Product Development  |
| FF         | Fonction de transfert  |
| UdeS       | Université de Sherbrooke   |
| ÉCV        | Évaluation du Cycle de Vie   |
| CDP        | Conception et Développement de Produits                                    |
| OSHA       | Occupational Safety and Health Administration                              |
| ANSI       | American National Standards Institute                                      |
| LIMAO      | Laboratoire en Ingénierie Mécanique Assistée<br>par Ordinateur             |
| DCL        | Diagramme du Corps Libre   |
| ALCC       | Average Life-Cycle Cost  |
| CTA        | Centre des Technologies Avancées   |
| DMU        | Digital Mock-Up  |
| CEEA       | Canadian Engineering Education Association                                 |
| FEA        | Finit Element Analysis   |
| DFA        | Design for Assembly  |
| DFM        | Design for manufacturing   |
| DFE        | Design for environment   |
| VTL        | Virtual testing laboratory   |
| FMEA       | Failure mode and its effects analysis                                      |
| AMDEC      | Analyse des modes de défaillances de leurs<br>effets et de leurs criticité |
| PC         | Processus de conception  |
| DFQ        | Déploiement de la fonction de qualité                                      |
| CdCF       | Cahier de charges fonctionnels   |
| MSM        | Méthode de séparation des moments  |
| ÉCV        | Étude de cycle de vie  |
| E&V        | Evaluation & Validation  |
| ZAT        | Zones affectées thermiquement  |
| Euro NCAP  | European New Car Assessment Program  |
| ...        | ...  |



# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Cette thèse, écrite dans le but d'aider les membres des équipes impliquées dans le processus de développement de produits structurels, fait la promotion autant de la prévention des défaillances, que d'autres critères très importants comme le coût, l'assemblage, la fabrication, le poids, la fiabilité, etc. Ce sont des éléments qui devraient représenter des pierres angulaires dans toutes les activités de conception et de validation effectuées durant le processus de développement de produits.

## 1.1 Mise en contexte et problématique

Un produit de bonne qualité ne représente pas le résultat du hasard. Il résulte plutôt d'une analyse soignée concernant les besoins du client et la façon d'articuler et réaliser les spécifications d'ingénierie [1-7]. Un aspect très important dans le processus de développement de produits (PDP) est la gestion des activités de conception et de validation du produit. Réserver du temps pour penser d'une manière rigoureuse au processus de conception, n'implique pas une perte de créativité. Plus encore, utiliser des outils spécifiques de gestion du processus de conception, ne veut pas dire qu'on sacrifie les compétences techniques ou inventives [8]. Par contre, il y a des organisations qui favorisent l'inventivité dans leurs processus de développement de produits en tant que partie intégrante de leur système de gestion.

À la suite d'une étude de la littérature corroborée par une expérience personnelle dans quelques entreprises œuvrant dans le domaine de l'industrie automobile, plusieurs lacunes ont été identifiées au niveau de la gestion de la conception technique. Dans les lignes qui suivent, on dénombre quelques éléments qui justifient le besoin d'intégrer et de formaliser la validation dans le processus de conception de produits, tant dans le domaine académique que dans le domaine industriel. Ainsi, trois besoins ont été identifiés au niveau du domaine académique :

- Il y a un vide dans la littérature scientifique concernant la formalisation des méthodologies de conception et validation à la phase de conception détaillée du PDP ;
- Les méthodologies de conception et validation qui seront développées s'avéreront très utiles pour la formation d'étudiants dans le domaine du génie mécanique;

- Le besoin d'améliorer la communication dans le milieu académique au niveau de la conception détaillée, en formalisant le processus de conception et de validation de produits.

Généralement, la gestion du PDP consiste à piloter toutes les activités successives et parallèles qui sont réalisées lors de la conception et la validation d'un produit [2]. Dans ce flux d'activités, le bénéfice recherché est l'identification, l'analyse et l'élimination de toute forme de gaspillage ou de mauvaise utilisation des ressources dans le PDP. Le gaspillage dans le PDP représente toute activité inutile, sans valeur ajoutée pertinente, que l'on peut éliminer, ou que l'on peut optimiser pour atteindre le résultat ciblé [6 et 7]. Ainsi, en ce qui concerne les besoins dans le milieu industriel, quelques éléments déclencheurs de la recherche ont été identifiés :

- La nécessité d'offrir un outil de planification graphique (Workflow) des différentes étapes effectuées à partir de la conception préliminaire jusqu'à la validation finale du produit ;
- La possibilité d'associer des ressources humaines, matérielles et financières à différentes activités de conception et validation, intégrées dans les méthodologies qui seront développées ;
- La nécessité de rendre plus facile la communication liée aux activités de conception et validation, aux différents membres de l'organisation (gestionnaires, nouveaux ingénieurs, techniciens, cadres, etc.) ;
- La nécessité de mieux gérer le lien entre les chargements simulés, les chargements obtenus en laboratoire et les chargements réels.

## 1.2 Définition et objectifs du projet de recherche

Une description du projet de recherche sera faite dans cette section par la formulation d'une question de recherche qui découle de la problématique. Le projet sera également formulé par la définition de l'objectif général de la recherche qui sera ensuite décomposé en objectifs spécifiques.

### 1.2.1 Question de recherche

*« Comment améliorer le processus de développement de produits au niveau de la conception détaillée et la communication entre les acteurs impliqués dans ce processus ? »*

### 1.2.2 Hypothèses

La formalisation du PDP à la phase de conception détaillée pourrait s'avérer une solution efficace pour la gestion des projets dans le domaine des produits récréatifs, domaine dans lequel peu de publications centrées sur la conception détaillée ont été publiées. À cet effet, une représentation graphique sous forme d'algorithmes, des étapes à suivre dans le cadre du processus de conception, facilitera le transfert de connaissances du domaine industriel vers l'univers académique. Une méthodologie détaillée de conception et validation représentera une liste de contrôle des activités à effectuer tout au long du développement du produit.

La formalisation des critères de conception et l'analyse de ces derniers dans diverses situations (ex. : nouveau produit, évolution d'un produit existant, etc.) ainsi que l'intégration de l'optimisation et de la validation de produit dans le processus de conception seront des facteurs qui faciliteront la communication à l'intérieur d'une équipe de concepteurs.

### 1.2.3 Objectifs

#### Objectif général

➤ **L'objectif général du projet de recherche est de développer et d'intégrer des méthodologies et outils de conception et de validation à la phase de conception détaillée dans le processus de développement de produits.** La conception détaillée implique des interactions entre trois éléments : **la géométrie, les matériaux et les chargements**. Dans le cadre du projet de recherche, les liens entre ces trois éléments seront formalisés au niveau des méthodologies de conception. Ainsi, le chargement traduira généralement les attentes du client et la plage d'utilisation du produit. Dans le cas d'un produit récréatif typique, cela pourrait correspondre à la capacité de charge de ses divers composants. Ensuite, en fonction d'un choix de matériaux donné, une géométrie est calculée selon un critère de résistance choisi (ex. : rupture, déformation élastique, rigidité ou fatigue). Ensuite, le coût et/ou la masse sont facilement déduits et

ceux-ci peuvent mener à l'acceptation ou au rejet de la solution. Toujours dans le cas d'un produit récréatif, un coût ou une masse trop élevés conduiraient à un nouveau choix de matériau ou à une nouvelle géométrie de manière à réduire les coûts finaux et/ou la masse tout en respectant le critère de résistance retenu en regard du chargement spécifié. Ce processus, de nature itérative, fait également intervenir des outils de calcul tels que des logiciels de calcul par éléments finis. **Dans le cas d'une structure complexe telle que le châssis d'un véhicule récréatif, la formalisation du processus itératif qui ciblera plusieurs critères et outils de conception et de validation dans diverses situations de conception représente donc l'objectif général à atteindre.**

## Objectifs spécifiques

- Dans la littérature existante, peu d'articles s'attardent à décrire les processus itératifs selon lesquels un concept est développé en produit dans le respect des contraintes du cahier de charges et en gardant un lien avec les connaissances disciplinaires et les outils d'assistance actuels. Pour combler ce vide, il s'avère nécessaire d'envisager des méthodologies de conception détaillée qui cibleront plusieurs critères de conception et qui s'adapteront ainsi à diverses situations de conception. À l'étape de la conception détaillée, dans le cadre du processus de développement de produits, il faudra également intégrer l'optimisation et la validation de produits. Les processus d'optimisation permettent de trouver une ou plusieurs combinaisons de paramètres maximisant ou minimisant un critère de conception donné tandis que les activités de validation fournissent une rétroaction au concepteur afin de vérifier l'exactitude des calculs réalisés et l'atteinte de tous les critères de conception. **Selon la nature de la validation (analytique, numérique ou expérimentale), des méthodes spécifiques seront élaborées afin d'intégrer les outils d'optimisation et de validation de produits à l'étape de conception détaillée.**
- D'un point de vue technique, la recherche examinera l'application de différentes connaissances et outils en fonction des méthodologies de conception élaborées. Au niveau des chargements, plusieurs aspects seront abordés dans le projet de recherche. Premièrement, l'identification des chargements dépend de la situation de conception.



Dans certains domaines tels que l'industrie aéronautique, l'identification des chargements est très bien documentée et fait l'objet de normes spécifiques. Dans d'autres cas, comme pour la conception d'une pince, le chargement représente directement les besoins du client. Enfin, dans d'autres circonstances encore, les chargements doivent être déduits d'exigences plus générales de fiabilité comme dans le cas d'automobiles ou de véhicules récréatifs. Dans ces derniers cas, on identifie deux situations : **1) Nouveau produit** (il n'existe pas d'autres produits similaires sur le marché et il n'y a pas non plus de comparaisons possibles) **2) Évolution d'un produit existant** (optimisation d'un produit propre à une entreprise ou d'un produit de la concurrence). Dans le premier cas, les chargements doivent être estimés, calculés ou mesurés tandis que dans le second, des essais sur un produit semblable permettent d'évaluer sa résistance ou sa tenue en fatigue pour une charge choisie qui pourrait ne pas avoir de liens avec les chargements réels. Ces deux situations correspondent respectivement à des approches de conception « absolues » et « relatives ». À partir de la deuxième situation de conception en découle également une nouvelle qui permet d'adapter le produit en fonction de plusieurs niches de clients. On appelle donc cette situation **3) Adaptation de produit**. **Le développement et l'application d'algorithmes adaptés à différentes situations de conception (nouveaux produits, évolution d'un produit existant, adaptation de produit) représenteront donc un second objectif spécifique de la recherche.**

- Quand on développe les exigences de l'ingénierie pour un produit, il faut recenser les informations nécessaires auprès de clients et d'autres sources afin de produire une palette spécifique de critères de conception. Dans la littérature existante, les critères de conception sont classifiés en deux catégories : les spécifications de fonctions et les contraintes [9]. Les spécifications sont généralement exprimées en termes de phénomènes physiques, quantifiables et en termes de relations mathématiques. La description textuelle d'une fonction est représentée par un verbe et un substantif : augmenter la pression, transférer le couple, augmenter la vitesse, etc. Les contraintes sont des facteurs externes qui limitent la sélection de certaines caractéristiques d'un système et qui, en général, sont imposées par d'autres facteurs qui sont en dehors du contrôle du concepteur. Généralement, le coût est considéré comme une

contrainte imposée par un client ou même par la direction d'une entreprise. Mais, si le client impose « le coût le moins élevé » du marché pour le produit développé, on pourrait également considérer cette contrainte comme une spécification parce que dans ce cas-ci, les concepteurs analyseront le coût par rapport à d'autres critères de conception (ex. : coût/performance, coût/qualité, coût/poids, etc.) et plusieurs solutions seront proposées. **Compte tenu du fait que cette classification génère encore des difficultés pour identifier la différence entre les deux catégories (exigences fonctionnelles et contraintes), un troisième objectif spécifique de la recherche serait de développer une nouvelle approche en ce qui concerne les *critères de conception* qui permettrait leur classification de manière uniforme afin d'éviter les confusions entre les deux termes.**

- Dans le cadre de l'ingénierie simultanée, la formalisation des processus est impérative pour atteindre les objectifs globaux du PDP (augmentation de la qualité, réduction du temps et augmentation de la productivité). Compte tenu du fait que chaque type de produit est développé selon des processus bien spécifiques implémentés (ou pas) en fonction de la capacité des entreprises d'intégrer les technologies appropriées et qu'il est impossible de créer une méthodologie de conception détaillée applicable à tous les produits, le présent projet de recherche se limitera à trouver des méthodologies détaillées de conception et validation qui cibleront l'industrie des véhicules récréatifs. Plusieurs besoins ont été identifiés dans ce domaine au niveau du processus de conception, à la phase de conception détaillée (voir la section 1.1). Si les chargements et les critères de conception et de validation sont établis en fonction de diverses situations de conception, la formalisation de PDP « personnalisés » est fortement recommandée, afin de faciliter les tâches des concepteurs et la communication entre tous les départements impliqués dans le processus. Par exemple, l'évaluation préliminaire des coûts liés à un PDP sera plus réaliste si le chargé de projet dispose d'une méthodologie détaillée de conception et de validation. **D'un point de vue organisationnel, la formalisation du processus de conception et de validation des produits structuraux dans l'industrie des produits récréatifs, constituera donc, un dernier objectif important à atteindre.**

### 1.3 Contributions originales

L'originalité du projet de recherche repose sur le fait que dans le cadre de la méthodologie proposée il y aura plusieurs critères proposés à l'étude (la limite élastique, la limite d'endurance, la rigidité, les coûts, la masse, le volume, l'assemblage, la fabrication, etc.), en fonction du type de produits (structural/esthétique, fixe/mobile, coûteux/bon marché, complexe/simple, etc.) et de la situation de conception (nouveau produit, évolution d'un produit existant, adaptation). Les algorithmes de conception et validation qui seront proposés permettront aux développeurs de produits structuraux d'avoir une vue d'ensemble des étapes à franchir et des contraintes qui peuvent apparaître durant le PDP (temps de développement, niveaux et types de validation, dépenses globales, etc.).

**L'approche de définition de plusieurs types de critères et des méthodes de conception et de validation dans le cadre du PDP permet une meilleure communication entre les membres d'une équipe multidisciplinaire à la phase de conception détaillée et représente une manière originale de développer un produit.** Par exemple, les membres d'une équipe multidisciplinaire qui développent plusieurs concepts fonctionnels auraient des difficultés à choisir le meilleur concept s'ils ne sont pas guidés par une méthodologie claire leur permettant d'évaluer les critères quantitatifs secondaires (coût, poids, volume, etc.) et les critères qualitatifs (assemblage, fabrication, esthétisme, ergonomie, etc.). Même si on les qualifie de secondaire ou qualitatif, ces critères peuvent être critiques pour la poursuite du projet et donc leur importance n'est pas négligeable.

Les méthodologies de conception qui se trouvent dans la littérature existante ne fournissent pas les algorithmes de conception à suivre dans un contexte spécifique, par exemple pour le cas des composantes structurales d'un produit récréatif. Conséquemment, la nouvelle approche de classification des critères de conception en trois catégories (*quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang, quantitatifs de 2<sup>ème</sup> rang et qualitatifs*), présenté dans cette thèse, représente un outil original de priorisation des différentes étapes dans le cadre du PDP.

**La méthode d'analyse par éléments finis sera ajoutée afin de réduire les itérations à l'étape de validation expérimentale représente également un point original du projet. D'un point de vue technique, l'originalité de cette méthodologie repose sur le fait qu'elle permet le calcul des contraintes dans la structure avant que celle-ci ne soit fixée et testée sur la machine d'essais. En utilisant cette méthode, les ingénieurs sont en**

**mesure de déterminer les forces à appliquer par la machine d'essais, forces qui induiront les mêmes contraintes que les forces appliquées dans des conditions réelles d'utilisation du produit.** L'ajout d'une étape de simulation numérique du montage expérimental à la phase de conception détaillée permet également de trouver la combinaison optimale de géométrie et de matériaux pour que le critère de conception étudié (transposé d'un besoin du client) soit respecté.

En effectuant cette étape d'analyse à la phase de conception détaillée dans le cadre du PDP, la rétroaction sur les besoins du client après les tests expérimentaux n'engendrera pas de modifications majeures dans la configuration du produit.

**Du point de vue logistique, l'intégration du paradigme de validation absolue dans le processus de conception représente un outil original pour les développeurs de produits. Pourquoi du point de vue logistique ? — parce qu'il sera toujours possible d'optimiser les paramètres de validation (*force appliquée par la machine de tests, spectres de cyclage, nombre de cycles, etc.*) en fonction du cahier de charges (*chargements réels, types de sollicitations réelles, durée de vie souhaitée, etc.*). Ainsi, les résultats expérimentaux seront plus précis, et ils refléteront mieux les conditions réelles d'utilisation du produit.**

Dans la littérature existante, il n'y a pas d'ouvrages qui proposent une telle méthodologie structurée, basée sur plusieurs critères de performance et qui intègre également plusieurs activités de conception et de validation.

Au niveau de l'étape de validation expérimentale détaillée dans la section 4.2.5., la procédure de cyclage en fatigue qui a été développée présente également une certaine originalité dans le sens qu'elle permet l'application de plusieurs types de chargements sur la structure étudiée, dans un seul test et avec un seul gabarit. Ceci c'est une procédure qui n'a jamais été utilisée pour valider en fatigue une structure dans l'industrie des produits récréatifs. Il y aura également quelques contributions importantes qui découleront du développement de méthodologies de conception avec l'approche proposée :

- La diminution du temps accordé à l'étape de développement des concepts. Les ingénieurs auront la possibilité de trouver, dans un temps assez raisonnable, la meilleure combinaison de géométrie et de matériau pour la fabrication d'un nouveau produit. Les calculs théoriques et les boucles d'itérations à la phase d'analyse de

critères aideront à éviter les essais inutiles et répétés. Ces derniers demandent en effet beaucoup de temps et peuvent être très coûteux.

- La qualité des produits développés sera influencée d'une manière positive par l'utilisation des méthodologies proposées. En effet, les boucles d'itération et les algorithmes de validation intégrés dans la méthodologie fourniront aux ingénieurs la rétroaction nécessaire pour que ces derniers puissent prendre les meilleures décisions à l'égard de chaque projet en cours, tout en tenant compte de trois éléments essentiels pour que le produit domine le marché : qualité, coût et performance.
- L'algorithme détaillé de validation réduira significativement le temps accordé à la planification des essais requis afin de bien valider le produit. Grâce à l'algorithme de validation qui sera implémenté dans la méthodologie générale, les ingénieurs seront en mesure de mieux anticiper les chargements à appliquer par la machine de tests et ainsi de réduire les itérations à la phase de tests expérimentaux.

## 1.4 Plan du document

Une brève description du document a été effectuée dans cette section, afin de fournir une vue d'ensemble des activités de recherche qui ont été franchies durant le programme académique.

- Ainsi, le premier chapitre du document présente une mise en contexte de la recherche et les éléments déclencheurs (académiques et industriels) qui ont été identifiés au début du projet. La question de recherche et quelques hypothèses répondant à cette question ont été incluses dans ce chapitre. L'objectif principal et les objectifs spécifiques de la recherche ont également été rédigés dans le cadre du premier chapitre.
- Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature où plusieurs paradigmes ont été détaillés et où quelques lacunes liées à la théorie de la conception ont été identifiées. Ainsi, une comparaison entre le processus de développement de produits et le

processus de conception a été faite afin d'éliminer toute confusion pouvant être engendrée par la ressemblance entre les formulations de ces deux approches. En ce qui concerne les critères de conception, le point de vue actuel sur ces derniers a également été présenté dans le deuxième chapitre. Toujours dans le cadre du deuxième chapitre, le paradigme *Design for X* a été détaillé avec ses significations (assemblage, fabrication, etc.) afin de l'intégrer par la suite dans la méthodologie générale de conception et de validation. Un survol de la littérature sur l'optimisation et la validation de produits a également été nécessaire dans ce chapitre afin de les intégrer ultérieurement dans la méthodologie générale de conception et validation de produits.

- La première partie du troisième chapitre présente le développement des nouvelles approches de définition des critères de conception, des types de produits (*nouveau, évolution d'un produit existant, ou produit adapté*) et des types de méthodes de conception et validation. Ces approches correspondent mieux aux besoins actuels identifiés dans le domaine du développement de produits. Dans la deuxième partie du chapitre 3, une méthodologie de conception et de validation de produits a été développée et détaillée. Toutes les étapes-bloc intégrées dans la méthodologie sont expliquées et deux articles appuient l'approche développée avec quelques exemples tirés de l'industrie des produits récréatifs.
- Le quatrième chapitre est dédié entièrement à la validation de la méthodologie développée. Pour souligner la pertinence de la méthodologie proposée, celle-ci a été appliquée dans un contexte industriel, plus exactement dans le processus de développement d'un nouveau châssis pour un roadster à trois roues. Les activités liées au développement des concepts, choix de matériaux et choix de procédés de fabrication et d'assemblage sont présentées brièvement, ces activités faisant l'objet des recherches de deux autres étudiants impliqués dans ce projet : Maxime Tacher et Yann Mogenot. Toujours dans ce chapitre, la nouvelle approche concernant la validation des produits structurels a été détaillée. Ainsi, les activités entourant tous les types de

validation (numérique, expérimentale, en service (physique)) ont été appliquées au châssis de référence et sont présentées dans les sections 4.2.4, 4.2.5 et 4.2.6.

- Dans le chapitre 5, chapitre qui conclue le présent document, on dénombre quelques contributions de la méthodologie dans les milieux académique et industriel. Quelques perspectives de recherche dans le domaine du développement de produits sont également présentées dans ce chapitre.
- L'annexe A présente les procédures d'utilisation de la machine de traction MTS.
- L'annexe B présente la méthode actuelle de validation expérimentale d'un système de châssis dans l'industrie des produits récréatifs.
- L'annexe C présente les points les plus sollicités de la structure de référence à la suite de plusieurs itérations effectuées à l'étape d'analyse par éléments finis (AÉF2). Ces points serviront à faire une comparaison entre les résultats des calculs numériques et les données recueillies à la suite de l'instrumentation de la structure sur la machine de traction.
- L'annexe D présente plusieurs paramètres identifiés à la suite de l'instrumentation effectuée sur le châssis de référence. Les paramètres identifiés ont été utilisés pour calculer la contrainte équivalente maximale dans diverses conditions extrêmes d'utilisation du véhicule (virage à 1,2 g et freinage à 1,7 g). La contrainte maximale admise permettra le calcul de la durée de vie à l'aide d'une courbe S-N (déterminée analytiquement). Autrement dit, la contrainte déterminée à la suite de l'instrumentation du châssis représente la contrainte équivalente complètement renversée utilisée le plus souvent dans les courbes S-N.

- Les articles intégrés dans les annexes E et F présentent d'une manière plus générale les travaux théoriques et expérimentaux, effectués dans le cadre du projet de recherche.



---

## CHAPITRE 2      ÉTAT DE L'ART

Les processus de conception de produits ont leurs origines presque 5000 ans avant nos jours, quand les gens concevaient des outils très simples puis d'autres produits plus complexes [1]. Tous ces produits sont le résultat d'un long et souvent très difficile processus de conception. Il y a une large palette de disciplines de conception (la conception mécanique, la conception électrique, la conception architecturale, la conception industrielle, la conception des matériaux, etc.) et pour chaque type de produit existant, il y a un processus de développement correspondant. Indépendamment du produit conçu, il y a plusieurs techniques appliquées par les concepteurs pendant le processus de conception [1].

Les tâches qui doivent être accomplies par les ingénieurs-concepteurs sont complexes. Celles-ci demandent la vérification de critères de conception, tels que la rupture du matériau due aux forces appliquées, les vibrations, les caractéristiques thermiques ou l'analyse dynamique.

Chaque entreprise peut avoir différentes méthodologies de développement et de conception, selon ses besoins. La complexité du produit, la compétitivité, le rythme de changement de la technologie sont des facteurs qui conditionnent les processus de conception et de développement de produits dans plusieurs entreprises.

### 2.1 Processus de Conception versus Processus de Développement de Produits

Dans le contexte commercial complexe actuel, la productivité des entreprises dépend en grande partie de leurs investissements en conception et développement de produits (CDP) [6-9]. En règle générale, les entreprises canadiennes qui investissent en CDP en tirent des avantages commerciaux additionnels ou des produits nouveaux ou grandement améliorés (ex. : de plus grands profits et un meilleur accès aux nouveaux marchés) [6-9]. L'investissement des entreprises en CDP peut se faire à l'interne ou par le biais de fournisseurs de services de CDP. L'industrie des services de CDP constitue un pilier technologiquement dynamique de l'économie tertiaire canadienne qui fournit des services

essentiels en innovation aux autres secteurs, notamment les fabricants, les distributeurs et les détaillants. Comme la CDP sert de lien entre la créativité, l'innovation et la commercialisation, il est essentiel de bien comprendre les tendances et l'importance de la CDP en tant que service à valeur ajoutée [9].

David G. Ullmann se demandait dans son livre, « The Mechanical Design Process » : « *Pourquoi doit-on étudier le processus de conception, même s'il y a dans le monde des millions de produits qui ont été conçus avant, et qui fonctionnent très bien ?* » La réponse vient aussi de sa part : « *Depuis des milliers d'années jusqu'à nos jours, il y a un besoin continu de nouveauté, de réduction des coûts ou de haute qualité du produit* » [1].

Des statistiques montrent qu'approximativement 85 % des problèmes dépistés dans les nouveaux produits sont le résultat d'un processus de conception faible [1, 2 et 9].

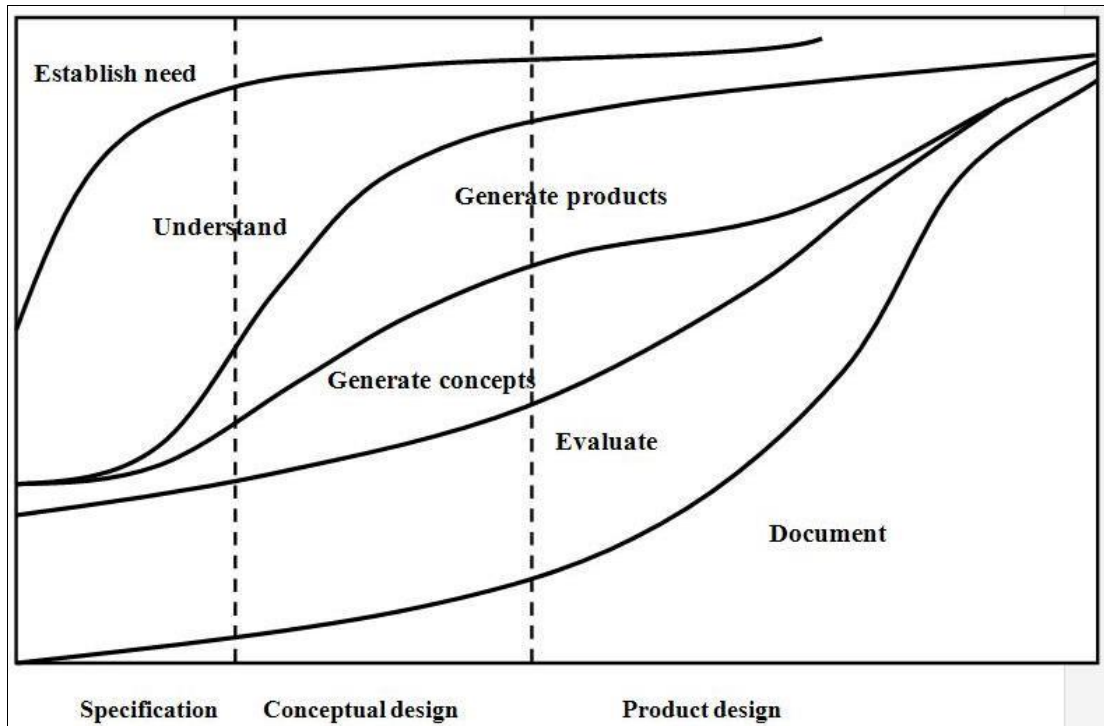
Chaque produit, que ce soit un produit unique ou un produit de masse, a son processus de développement qui compte six étapes [1-4] : a) Spécifications et planification; b) Phase conceptuelle; c) Conception du produit; d) Fabrication; e) Utilisation et maintenance; f) Retrait du produit/Recyclage.

Seulement les trois premières étapes (a à c) représentent le processus de conception d'un produit. Le but de la première étape (a) *Spécifications et planification*) est d'établir les spécifications liées à la performance du produit ainsi que le temps et l'argent alloués pour le développer et le réaliser [1-8]. On peut nommer cette étape, « avant-projet ».

Au cours de la deuxième étape (b) *Phase conceptuelle*), les ingénieurs développent des idées générales sur les fonctions et l'aspect du produit. Des dessins sommaires et des esquisses sont effectués pour représenter les concepts.

Finalement, la troisième étape dans le PDP (c) *Conception du produit*), commence avec le concept désiré et se termine avec l'étape de préparation à la fabrication. La majorité du temps investi dans le processus de conception, correspond à cette étape [1].

La figure 1, illustre les trois premières étapes représentant le processus de conception (a) spécifications et planification, b) phase conceptuelle et c) conception du produit) et les six mesures prises par les ingénieurs afin de résoudre les problèmes de conception pendant ce laborieux processus soit : établir les besoins, comprendre le problème, générer des concepts, évaluer les concepts, générer des produits, documenter la solution retenue.



**Figure 1: Les relations entre les étapes de conception et les actions prises pendant ce processus [1]**

Au début du processus de conception, la plupart des efforts sont concentrés afin d'établir les besoins et comprendre le problème de la conception. À la fin du processus, les activités de documentation des résultats sont prédominantes.

Otto et Wood [2] définissent également le processus de conception de produit comme étant une série d'activités techniques, intégrées dans le processus de développement du produit et qui incluent des relations entre les diverses visions du produit et les spécifications techniques, le développement des nouveaux concepts, le développement de l'architecture du produit, etc.

Les trois phases du processus de conception de produit sont également détaillées par Otto et Wood et illustrées dans la figure 2 [2]. La première phase (comprendre l'opportunité) couvre toutes les activités nécessaires afin de pouvoir prendre la décision de s'impliquer ou non dans le processus de développement d'un nouveau produit. La deuxième phase (développement des concepts) couvre les activités nécessaires afin de pouvoir établir les fonctions et l'architecture du nouveau produit. La troisième phase (implémentation du concept) couvre toutes les activités nécessaires afin de pouvoir valider le produit. Après cette dernière phase, le produit est prêt pour le processus de fabrication.

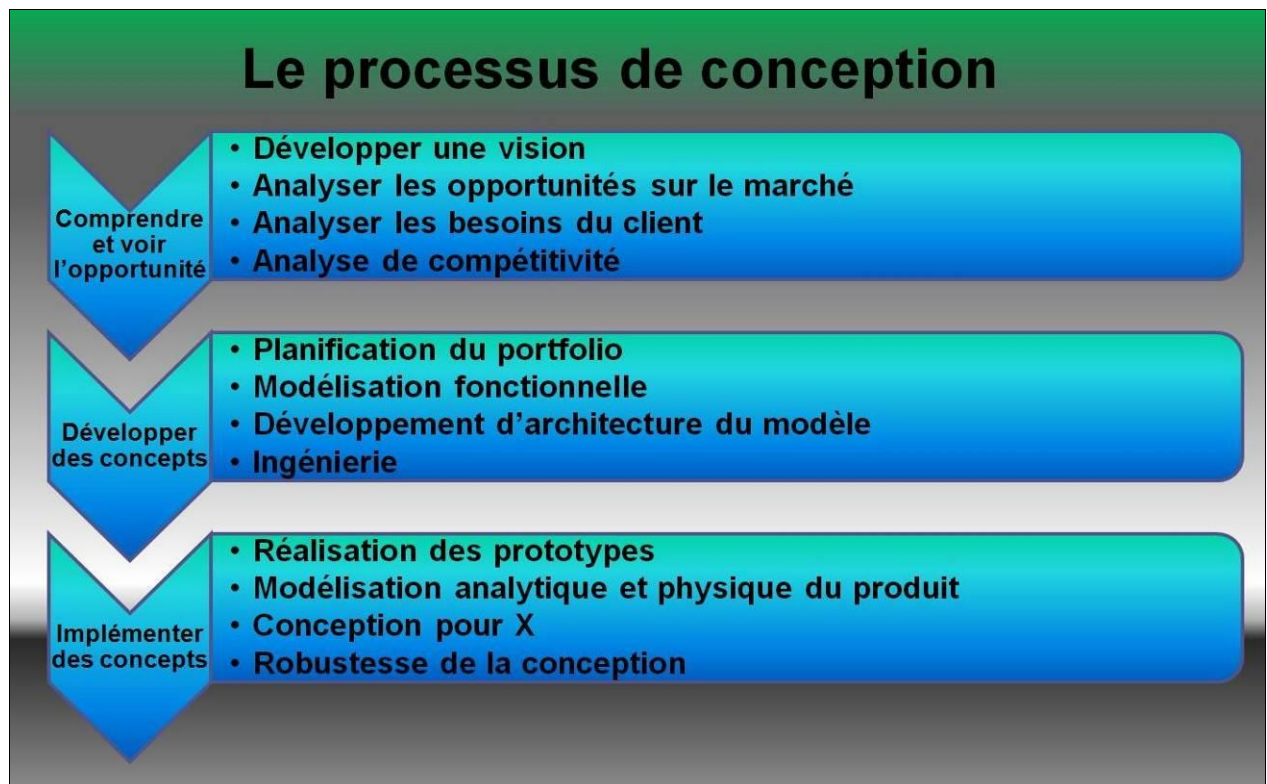


Figure 2: Matrice des étapes par phases dans le processus de conception de produits [traduit de 2]

La matrice développée par Otto et Wood (figure. 2), contenant les étapes de chaque phase du processus de conception d'un produit, est très semblable à la philosophie de Ullman (figure. 1) en ce qui concerne les trois étapes principales à suivre dans le processus de conception [1-8].

En particulier, les étapes du processus de conception de Ullman sont davantage détaillées dans la figure 3.

La première étape du processus de conception est d'établir les besoins du client et les priorités des tâches. Pendant l'étape de planification, le but est de comprendre le problème. Pour la plupart des projets, la formation d'une équipe de concepteurs est nécessaire. Très rares sont les situations où seulement une personne conçoit un produit ou même un sous-assemblage [10-15].

La première fonction étant accomplie (comprendre la problématique de conception), l'équipe doit établir la planification pour ce qu'il reste à faire dans le processus de

conception. Le plan doit proposer une stratégie bien définie et il doit fournir des estimations en ce qui concerne les ressources (personnel, coûts) et le temps.

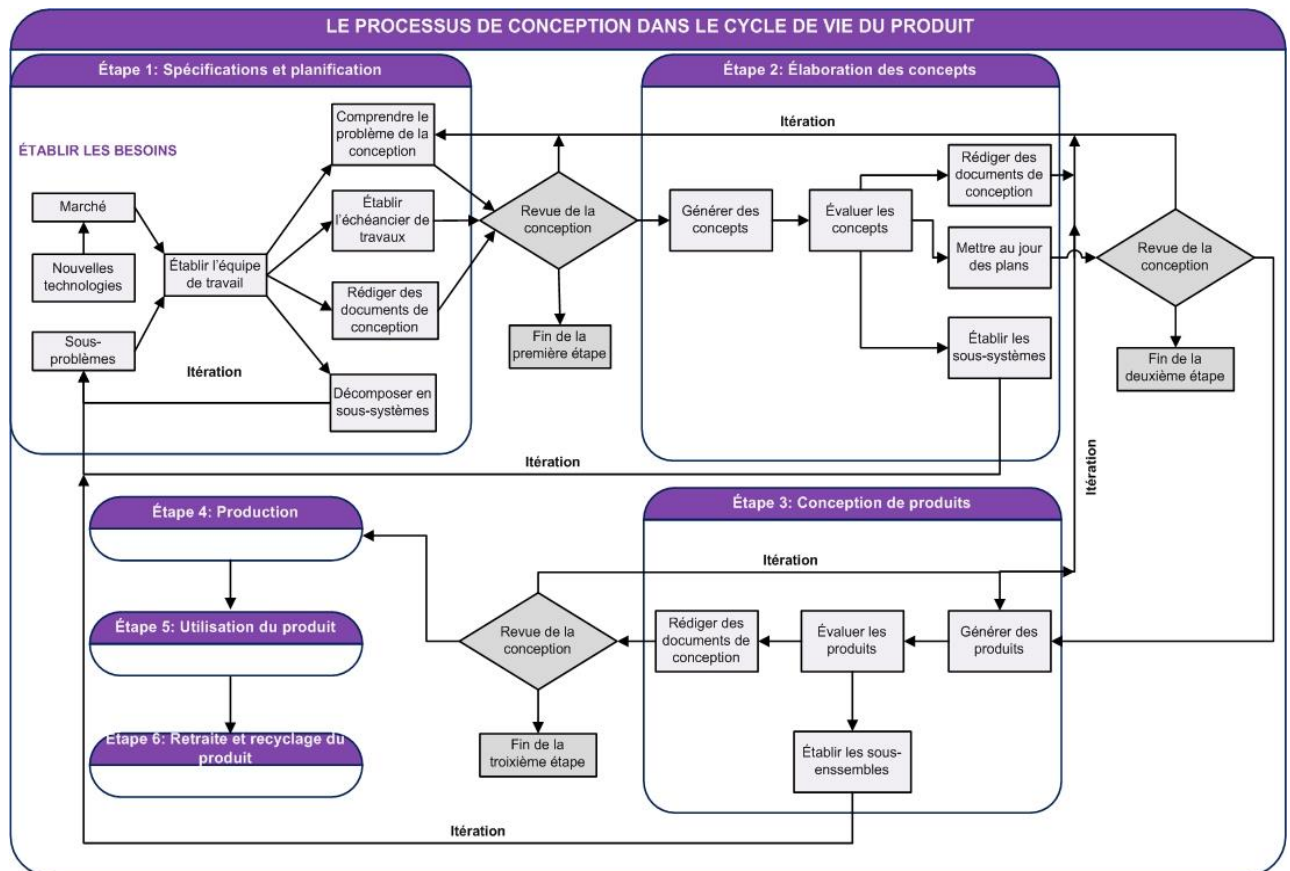


Figure 3: Le Processus de Conception, partie intégrante du PDP [traduit de 1]

Les concepteurs utilisent les résultats de la première étape pour générer et évaluer les nouveaux concepts (2<sup>ème</sup> étape). Le but de l'étape d'élaboration des concepts est de confronter les concepts générés suite aux demandes identifiées pendant la première étape (développement de spécifications, planification) et de choisir la meilleure solution qui respecte les critères de conception suite à une convergence de concepts [16].

Après que les concepts aient été générés et évalués, c'est le moment de transformer le concept retenu en un produit (3e étape) [16].

Dans la première partie de cette section, le processus de conception a été présenté tel que plusieurs auteurs l'ont déjà fait. Dans les lignes qui suivent la notion de processus de développement de produits (PDP) sera détaillée pour faire la distinction nécessaire entre les deux notions et d'éviter la confusion dans leur utilisation.

Le processus de développement de produit comprend donc, la totalité des activités ayant pour but de transformer les nouvelles idées en concepts, puis les concepts en produits et de préparer ces derniers pour le marché. Cette série d'activités inclut toutes les étapes de conception, optimisation et validation qui commencent avec l'analyse de plusieurs idées et la génération de nouveaux concepts et qui finissent avec les activités de marketing et les plans de préparation à la fabrication et de lancement du produit sur le marché [6, 17].

Il y a deux philosophies utilisées pour la gestion des activités dans le cadre du PDP : l'ingénierie séquentielle et l'ingénierie simultanée. La figure 4 illustre très bien l'avantage de l'ingénierie simultanée en ce qui concerne le gain de temps pour les principales étapes du processus de conception (PC).

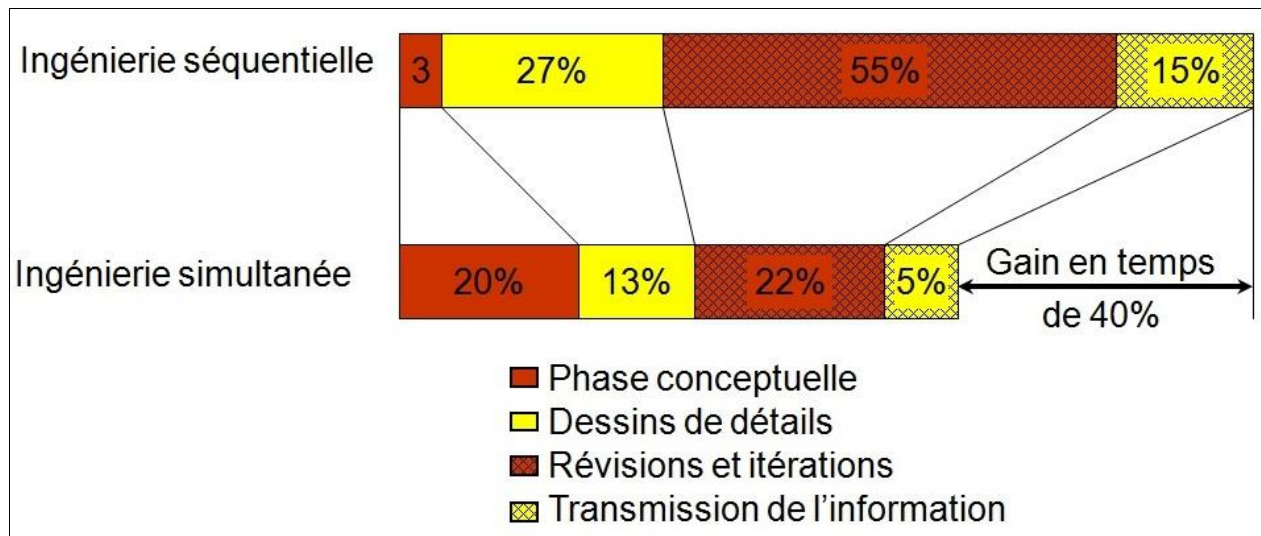


Figure 4: L'ingénierie séquentielle vs. L'ingénierie simultanée [tiré de 9]

Kusar et Duhovnik[18], présente très bien les avantages de l'ingénierie simultanée, en comparaison avec l'ingénierie séquentielle. L'ingénierie simultanée est une approche systématique et multidisciplinaire qui intègre simultanément les différentes phases de développement d'un produit et la gestion de son processus : identification des besoins du client, spécifications du produit, conception du produit et de ses moyens de fabrication puis enfin fabrication du produit tout en tenant compte du cycle complet de la vie du produit, incluant le service après-vente, la maintenance, la mise au rebut ou le recyclage [19-21]. Contrairement à l'ingénierie simultanée, dans le cadre de l'ingénierie séquentielle, les départements responsables de chaque étape du PDP travaillent de façon

isolée et pour cette raison la communication entre les équipes impliquées dans un projet est très faible [9].

Dans le contexte actuel où la globalisation du marché connaît une pleine expansion il est donc évident que l'ingénierie simultanée est de loin préférable lors de l'élaboration d'un nouveau produit.

Tout d'abord il est nécessaire de déterminer le domaine d'utilisation du produit qui sera développé, ce qui correspond directement au marché cible. Une étude de faisabilité, qui est à la base du processus de développement du produit, sera imposée dans un tel cas [20-24]. Généralement, une étude de faisabilité comprend les activités suivantes :

- Établir les conditions commerciales pour les futurs produits développés ;
- Établir les conditions financières pour la réussite de l'implémentation du projet ;
- Établir toutes les tâches pour la mise en œuvre du projet ;
- Établir les équipes qui agiront dans le processus de développement du produit [22].

Le PDP et le PC ont été décrits par plusieurs auteurs, et les philosophies étudiées couvrent d'une façon générale les principales étapes qui doivent être accomplies par les ingénieurs. **Mais les auteurs ne se penchent pas sur le développement des méthodes détaillées de conception et de validation dans le cadre du PDP. C'est la raison pour laquelle il s'avère pertinent de concevoir un algorithme détaillé permettant de couvrir toutes les étapes comprises dans le processus de conception, incluant les activités d'optimisation et de validation.**

**Actuellement, le processus de validation constitue une étape intermédiaire entre la conception du produit et la mise en production de celui-ci [1-6, 20-23]. L'intégration de la validation dans le processus de conception fournira aux concepteurs la rétroaction nécessaire pour la vérification des calculs effectués à l'étape d'analyse de critères et une réduction globale de la durée et des coûts du processus de développement de produit en vérifiant plus tôt l'adéquation du produit avec les spécifications issues du cahier des charges.** Une intégration de l'optimisation et de la validation dans le processus de conception lui-même et sa prise en considération dès le début du projet, aideront donc les ingénieurs à préparer une analyse préliminaire des coûts et un échéancier du projet qui soient plus exacts.

## 2.2 Critères de conception : Éléments du CdCF et des Notes à la conception (article\_1)

L'article présenté au début de cette section représente un survol de la littérature existante et il propose une intégration de la validation à la phase de conception détaillée, dans le but d'assurer le respect de tous les critères de conception tout au long du PDP.

L'article qui suit contribue à la thèse en élaborant une méthodologie générale de conception applicable dans divers contextes de développement de produits (ex. : nouveau produit ou l'évolution d'un produit existant). L'article est suivi par quelques notions théoriques identifiées dans la littérature scientifique en ce qui concerne les critères de conception et les méthodes d'identification de ces derniers à la phase de conception préliminaire.

### Avant-propos

#### **Auteurs et affiliation :**

C. Iorga : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique ;

A. Desrochers : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date d'acceptation :** 15 mai 2010

**Conférence :** CEEA, 6-8 juin 2010 Kingston, ON.

#### **Références :**

7) [Jones C. and Ertas A. (1993)] ; 43) [Kolb J. and Ross Steven S. (1980)] ; 21) [Seider, Warren, D. (2009)] ; 1) [Ullman D. G. (1992)] ; 42) [Lemay É. (1995)] ; 2) [Otto K. and Wood K. (2001)] ; 6) [Cooper G. Robert (1993)] ; 8) [Pahl G., Wallace K. and Blessing L. (2007)] ; 16) [Pugh, S. (1991)] ; 20) [Saaksvuori A. and Immonen A. (2004)] ; 4) [Ulrich K., and Eppinger S. (1995)] ; 62) [Pépin J.-F (2008)].

**Titre français :** Le processus de développement de produits à la phase de conception détaillée



## **Contributions au document :**

Les notions théoriques utilisées dans cet article représentent le résultat d'une étude de la littérature existante dans le domaine de la théorie de la conception.

## **Résumé français :**

*La diversité des produits sur le marché nous amène à convenir que pour chaque type de produit conçu, fabriqué et commercialisé, il existe une méthodologie spécifique et un processus de développement correspondant. En effet, chaque entreprise peut avoir des PDP et des méthodologies de conception différentes pour répondre à ses besoins spécifiques. La complexité du produit, la compétitivité du marché et le rythme du changement dans la technologie sont tous des facteurs qui conditionnent les processus de conception et de développement. La méthodologie développée se concentrera sur l'étude de certains critères de conception et de validation (la limite d'endurance, la limite élastique, la limite ultime, la rigidité, etc.). La méthodologie proposée comporte quatre phases : 1) Collecte des données, 2) Analyse/Optimisation, 3) Revue de la conception, 4) Validation. Les deux premières étapes représentent la dimension quantitative (théorique) de la méthodologie dans laquelle plusieurs alternatives sont développées pour répondre aux critères de conception. Les étapes 3 et 4 représentent la dimension qualitative (choix et validation de la solution finale). Plus précisément, le choix d'une solution parmi plusieurs alternatives sera pris à l'étape 3 avant de commencer les travaux de prototypage. Dans la phase de validation (étape 4), les ingénieurs doivent sélectionner les critères et les outils de validation qu'ils jugeront appropriés. La méthodologie comprendra également une étape d'analyse économique (ratio prix/performance) permettant aux ingénieurs de prendre les meilleures décisions concernant les paramètres de conception (géométrie, matériaux, chargements). Les boucles d'itération fourniront un mécanisme efficace de suivi pour tous les changements de paramètres, à la suite de l'analyse théorique et des essais physiques. La méthodologie pourrait être appliquée à différents types de produits (nouveau concept et évolution d'un produit existant).*

## Generic Product Development Process at the detailed design phase

Cristian Iorga  
Student  
[Cristian.Iorga@USherbrooke.ca](mailto:Cristian.Iorga@USherbrooke.ca)

Alain Desrochers, P.eng.Ph.D.  
Professor  
[Alain.Desrochers@USherbrooke.ca](mailto:Alain.Desrochers@USherbrooke.ca)

Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, Université de Sherbrooke

### ***Abstract :***

*The diversity in the types of products on the market, leads us to agree that for each type of product manufactured, there is a specific methodology and a corresponding product development process. Each company may indeed have different development and design methodologies, to suit their specific needs. The complexity of the product, the competitiveness of the market and the pace of change in technology, are all factors that model the design and development processes. Remaining competitive requires from companies that they use design methodologies and production techniques that enable them to design and manufacture their products in the shortest possible time. The methodology that we have developed will focus on the achievement of some design and validation criteria (fatigue, ultimate strength, stiffness, elastic limit, etc.) The proposed methodology features four phases: 1) Data collection, 2) Analysis / Optimization, 3) Design review, 4) Validation. The first two steps represent the quantitative dimension (theoretical) of the methodology in which several alternatives are developed to meet the design criteria. Steps 3 and 4 represent the qualitative dimension (choice and validation of final solution). More specifically, the choice of a solution among several alternatives will be taken in step 3 before starting the prototyping work. In the validation phase (step 4), the designer will select the criteria and validation tools, as deemed appropriate. The methodology will also include a step dedicated to the economic analysis (price / performance ratio) therefore enabling engineers to make the best decisions regarding the design parameters (geometry, material, loads). Iteration loops will provide an efficient tracking mechanism for all the parameter changes, following the theoretical analysis and physical testing. The methodology will be applied on two different types of products (new concept and design as an evolution of an existing model)*

## **1. Introduction**

Engineering design is a process which includes developing a system, component, or manufacturing process with the desired needs. The process of engineering design is also a decision making process, in which the basic sciences, mathematics, and engineering sciences are applied to convert resources in the best possible way to meet the initial objective. For the time being, the current Mechanical Engineering curriculum at the Université de Sherbrooke successfully promotes the design and fabrication of functional prototypes as an outcome of the bachelor's degree. These typically express the first and most creative phases of the product development process (course IMC 156 on Design Methodology developed by F. Charron). However, in an industrial context, additional phases such as cost optimization and reliability validation have to be addressed prior to production. Such steps are often overlooked in engineering curricula despite being critical to the commercial success of a product. Achieving both on a given product is challenging since these two phases are often contradictory: Reliability involves better parts and manufacturing, whereas lower cost favors cheaper material and processes. Therefore, accurate data on product use and loading, as well as appropriate numerical simulation and experimental fatigue testing become paramount in order for the design engineer to strike a balance between reliability and costs while reaching product life targets.

### **1.1 The impact of the design process quality, cost and development time of a product**

At the beginning of the design process, most efforts are concentrated to determine the needs and understand the problem of design. At the end of the process, the activities of documenting the results are prominent. Engineers, who have no knowledge regarding the manufacturing process, will develop products that will be difficult to produce or manufacture, or these products will involve additional costs. The process of product design is a series of technical activities, included in the process of product development. These include relationships between the visions for their product and technical specifications, development of new concepts, development of product architecture, etc.

Jones and Ertas, speak about a few techniques for improving the design process [7]. Thereby, **the functional cost analysis** is the technique that involves breaking the product down into its component parts and determining the cost effectiveness of the elements relative to the importance of the functions being provided. This technique allows the high cost areas of the design to be identified so that effort can be concentrated on cost reduction or enhanced functionability.

Another technique used for improving the product design and which can be applied for one component, subsystem, or system level, depending on the product being designed, is **Failure Mode and Effect Analysis** (FMEA). This approach provides a synthesis of overall product subsystems safety. Also, it identifies critical components and provides information regarding the sensitivity of product subsystems [7]. The key questions posed by this analysis regarding the impact on the quality of the product are: 1) What could be wrong with each product component? 2) What is the probability of failure and what are the consequences produced by the failure? 3) What steps should be implemented in the design process to prevent the failure? [43]

The principle of the reduction of variability in the performance of the product is met in a third method for improving the design product and this is the **Taguchi Method**. To accomplish this goal towards the reduction of critical components in the product, the factors causing the variability in the product functions must be well understood so that design sensitivity to these causes can be minimized. [7, 43, 21, 1]

## 1.2 Product Optimization

The optimization of a product at the detailed design phase is a continuous cycle of controlled experiments on a developed product where its components or subassemblies under tests provide immediate feedback on the product design. Once this cycle is completed, engineers will choose the best options. For complex products, a stronger integration is needed between the structural analysis and other traditionally separate fields, such as aerodynamics, heat transfer, propulsion, controls and electromagnetism [42, 2]. Generally, product optimization projects are carried out by specialized engineering companies, in collaboration with industrial partners and projects revolve around three key components: Multidisciplinary team; methodologies; and technologies.

Problems associated with design optimization have been the subject of considerable attention for a number of years [7]. During the last several decades the field of design optimization has made remarkable progress in system design and engineering analysis and many modern optimization methods have been developed. Thus, the design of complex systems has become possible within an optimum computational time. There are two kinds of effects associated with any product or system: 1) Undesirable effects such as large vibrations and deflections, excessive cost, low fatigue resistance. 2) Desirable effects such as long useful life of the product, good lubrication capacity, good corrosion behavior. Application of product optimization at the detailed design phase requires formulation of an objective function such as resistance to corrosion, cost, weight, or fatigue failure and the expression of design constraints as equalities or inequalities. Also, the engineers have to take into consideration in their design constraints, the requirements specified through regulations, laws as well as national and international standards, regarding the safety of product users. For example, one of these constraints could be the parameters of the light projection (angle and intensity) of an automotive headlight [6, 7 and 8].

### **1.3 Product Validation**

The validation phase covers all activities related to research and product development, studies of pilot batches storage and handling of the finished and unfinished products. The validation of a product is a very important step that most often involves additional costs. Thus, engineers must take into consideration the cost / benefit ratio to decide to what level validation is needed for the new product. To respect the job safety and health standards, the engineers must be able to identify hazards associated with their work and to quantify the impact and severity of a potential failure of their designs. Thereby, a product validation algorithm, which constantly evaluates the design for safety, must be developed. The quality, safety and efficiency must be part of the product [4, 7 and 16]. Cooper speaks in his book, about the tests that can be made with customers. The product must work right when the customer uses it, not only during the laboratory tests. Thus, user tests during the development process of the design and after the prototype is ready, often prove the success of the product. Some of the main objectives of the customer tests

can be to determine if the functions of the product are met in actual operation conditions and to forge a vision of the benefits, level of interest and required features of the product [6]. With the evolution of technology and the ever increasing complexity of new products, new development methodologies require more focus on design and validation criteria for new products. Thus, our efforts are focused on finding a design methodology with optimization loops which will be performed for each criteria analysis. Moreover, designers can intervene on the design parameters (material, geometry and boundary shape), should an error be detected in the theoretical calculations or in the prototyping and testing phases of the design process.

## **2. The Objectives**

The main objective of this paper is to propose a methodology for complex product design that could be used in several design situations and which will reduce the duration and costs of the design process. The proposed methodology will cover the detailed design phase and will tackle two dimensions. The first dimension is focused on finding the best combination of material / geometry based on a performance driven criterion (stiffness, elastic deformation, ultimate yield, fatigue, etc.). The second dimension is dedicated to the validation of new products. More specifically, an important goal will be to establish a validation method to confirm the results of the theoretical and numerical analysis conducted on a given product. The originality of the proposed method owes to the fact that there are several elements and criteria proposed in the study (fracture, resistance, costs, mass, volume, etc.) Also, the optimization loops of the proposed methodology will allow the designers and managers to control the design process from the first steps of the project until the final validation. The parallel analysis of multiple design criteria and several validation criteria will be used by engineers to make better decisions regarding the type of tests chosen and the level of validation for new products. Unfortunately, there are not many publications focused on complex methodologies based on multiple design types and criteria. The present research in this field at UdeS is focused on finding the appropriate methodology for validation algorithms and iteration loops which will reduce the time allocated for the design process, thus helping engineers achieve the best performance/costs ratio.

### 3. Design methodology based on multiple performance criteria

One of the intents of the detailed design phase of the design process is to develop a system of drawings and prototypes that completely describes a proven and tested design so that it can be manufactured. At this stage, all the various disciplinary teams are actively involved in the analysis process, evaluating components, assemblies or products to validate previously established requirements for the new product.

A very important step in evolving from a prototype to a product is that of optimization, where engineering choices are made to reduce production costs while at the same time maintaining the functionality and attractiveness of the product. However, this entails specific engineering knowledge and tailored methodologies. More specifically, product structural optimization starts with the proper identification of critical load cases on a given structure or product and involves the choice of appropriate material and geometrical parameters as variables to achieve some performance target. These in turn translate as optimization criteria with appropriate safety factors. Typical optimization criteria include resistance ( $S^u$  or  $S^y$ ), rigidity and product fatigue life expectancy. Criteria based on the ultimate strength ( $S_u$ ) are seldom selected but examples of their use include the design of bolted joints. Resistance criteria based on the yield strength is most common as it implies that the designer will not allow the part to accept permanent deformations under load. Rigidity is more stringent than resistance as it limits the amount of allowable strain. This is typically specified for sports cars where handling performance requires a frame with high stiffness. Finally, fatigue life target is often selected in a bid to limit costs while meeting product warranty periods.

Moreover, the optimization procedure must adapt to the type of development at hand, whether it is for a new product or the evolution of an existing model. In the case of a new product, load cases may be tricky to identify for lack of experimental data supporting the design requirements. Hypotheses and predictive models, both theoretical and numerical, must then be used to fill that gap. In the case of the evolution of an existing product, either from the same company or from a competitor, current product model performances may be used as a benchmark for the product to be designed. Alternatively, experimental testing on a comparable existing product may provide the required data and corresponding validation procedure to support the design process. All



of these elements must be taken into account in the development of specific design methodologies and corresponding validation procedures to be subsequently integrated in the “product optimization and validation” procedure that is being envisioned. Surprisingly, and despite the obvious strategic and technical interest these aspects of design may bear, there is very little to be found in the way of publications on these subjects. [7][42][20]

As mentioned above, the first goal of this project is to propose a new design methodology, taking into account the geometric parameters, material criteria, but also the validation conditions (physical tests). In figure 5, a new methodology generally applicable to a wide range of products is presented. Indeed, optimization concepts will be based on specifications taken from the product requirements, after analyzing the range of solutions based on the criteria established by the engineers. It can be observed in the section of tests and validation of the methodology that the optimization can be done taking into consideration either the safety factor or the loads. The proposed methodology covers chronologically all steps required in the design process to achieve the intended result. Thus, in a first step of census data, the design team will be formed and will establish the design tools, product requirements and the needs of the client. At this stage, the initial design parameters and performance criteria that will be analyzed (fatigue strength, the ultimate limit, stiffness, etc.) must also be established. The methodology continues with the second stage, which will be dedicated to the analysis of the performance criteria selected. This step will contain two iteration loops that will allow designers to make better choices regarding the three design parameters: material, geometry and design, while taking into account the price/performance ratio. Based on the results obtained from the analysis criteria and the constraints established at the beginning of the process, adjustments on the geometry of the product, or (if applicable) material changes can be made. These first two steps represent the quantitative dimension of the methodology in which designers will perform calculations and analyze criteria to find several eligible solutions before submitting them to the economic analysis. In a third step, the engineers will be able to take the final decision on the performance parameters. At this point, there will be a meeting with the client or the company management team (for products developed 100% in one company). After receiving approval from the client, the



team can proceed to the execution of 2D drawings and prototypes. Once the prototype is completed, it will undergo tests to validate the product. Each product type requires different validation tools and the engineers must develop algorithms for specific validation types that should be addressed (fatigue testing, stiffness test, ultimate strength test, etc.). In this final stage of the methodology, another optimization loop will allow the designer to optimize the loads or the safety factor. Thus these main stages of the methodology will allow for the design, optimization and validation of the product.

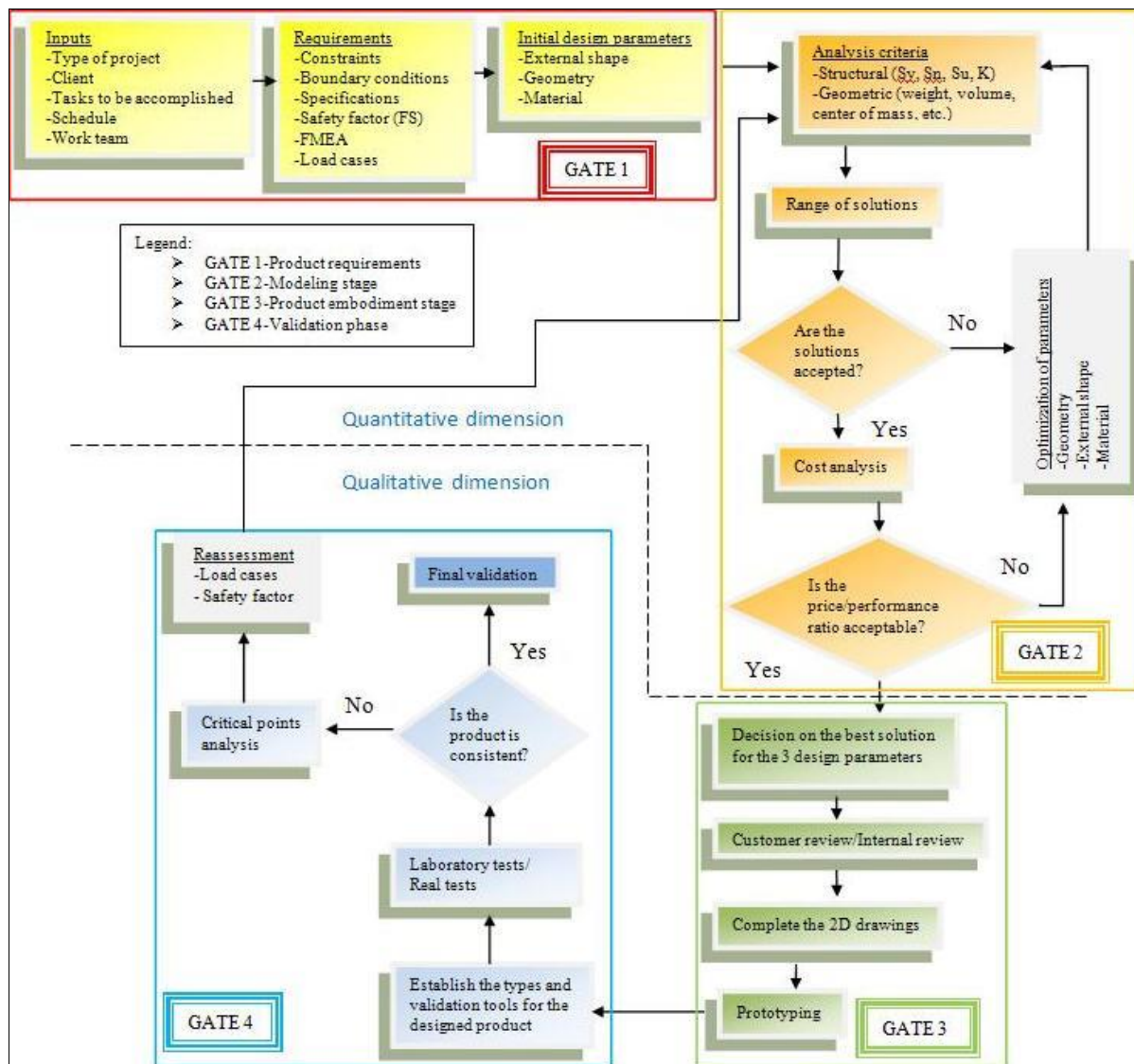


Figure 5: General methodology for the design engineering process

The first two steps or gates of the methodology, which represent the quantitative dimension, are then followed by steps or gates 3 and 4 (Revised Design and Validation); the qualitative dimension. In other words, the qualitative methodology is used by the engineers to reach the best decisions for achieving the functions envisioned for the product design. Implementing this approach with examples and applications is an original way to provide the students with the necessarily skills and feedback for their future activities as engineers.

#### 4. Conclusions

The proposed design approach features several key contributions to the process of product development. Hence, a general methodology focusing on several performance criteria allows the designer to optimize the design parameters after each phase of the design process. This, in turn, generates a reduction in the time required for the concept development stage. The designers will also be able to find the most reasonable combination of geometry and material for the new product. The section dedicated to the complete validation of new products allows engineers to monitor the achievement of each performance criterion chosen (stiffness, tensile strength, durability, cost, etc.). Thanks to the validation algorithm developed within the proposed methodology, it will always be possible to maintain a connection between the theoretical analysis of the chosen criteria and the results of the physical tests. Thus, the iterations in the design process will be completed more quickly. In this domain, there are works that present the design process and the process of product development, but very few present methodologies addressing several simultaneous design criteria and containing sub-algorithms such as those for the conversion of materials or for product validation. A material conversion algorithm applied to aluminum has been developed by Pepin in his master degree thesis "*Development of a conversion methodology for structural parts from steel to aluminum*" [62]. These types of sub-algorithms are used to help designers in their efforts to optimize and validate a product and will be addressed in future works. In other words, the detailed design methodology developed here opens the way for the development of other methodologies and algorithms more specifically targeted toward precise design situations (new product, improvement over an existing product, material conversion, and validation

algorithms). In some future works, the proposed methodology will be applied on real design cases to prove its relevance.

*(Fin de l'article)*

## Post-propos

Le type d'algorithmes présenté dans l'article précédent, aide les concepteurs dans leurs efforts d'optimiser et valider un produit et il sera utilisé dans les futurs travaux de développement des nouvelles approches théoriques dont l'objectif sera d'intégrer la validation à la phase de conception détaillée du produit. En d'autre termes, l'algorithme détaillé dans l'article ouvre la voie à la mise au point des méthodologies plus spécifiquement ciblées vers différents contextes de développement de produits et qui seront basée sur plusieurs types de critères de conception.

=Continuation de la section 2.2 Critères de conception=

Les critères de conception sont des objectifs explicites qu'un projet doit atteindre pour satisfaire les besoins du client. Les ingénieurs utilisent ces critères en tant qu'outil de base dans l'évaluation de la faisabilité d'un projet potentiel et comment ce dernier pourrait s'intégrer dans les objectifs de l'organisation [8, 9, 24-26]. Actuellement, les critères de conception sont divisés en deux catégories : critères primaires et critères secondaires [1-9].

Les critères primaires sont incontournables pour la réussite du projet, donc le non-respect d'un de ces critères peut amener le projet à l'échec (ex. : la résistance en flexion/torsion, la rigidité, la limite d'endurance en fatigue, la résistance à la corrosion, à l'usure, etc.) [1-9].

Les critères secondaires sont des caractéristiques qui sont hautement souhaitables, mais pas absolument indispensables (ex. : la fabrication, l'assemblage, le poids, le volume, l'ergonomie, etc.) [1-9].

Séparer les critères primaires et secondaires établit une hiérarchie claire dans les choix de conception. Souvent, l'amélioration d'un critère rend impossible ou coûteuse la mise en œuvre d'un autre et les ingénieurs auront la possibilité de sacrifier un critère secondaire

au profit d'un critère primaire [2]. Cette façon de classer les critères de conception est très intéressante, mais elle présente également quelques lacunes. **Premièrement, il y a dans la même catégorie, des critères quantifiables et non quantifiables, ce qui n'est pas souhaitable avant l'analyse DFQ1 [9]. Deuxièmement, n'importe quel critère dénombré ci-haut dans la catégorie des critères secondaires, peut représenter un critère critique « d'arrêt » dans le cadre du PDP et donc on pourrait le considérer comme un critère primaire.**

Otto et Wood définissent les spécifications d'ingénierie comme étant les critères de conception quantifiables et mesurables devant être satisfaits :

*« Si ce n'est pas testable ni quantifiable, ce n'est pas une spécification d'ingénierie. »*  
[2]

Les auteurs [2, 7, 9] présentent également trois approches que l'on utilise pour déterminer la liste de critères dans un PDP :

- Utilisation d'une liste de contrôle qui implique l'application des méthodes RESEAU : (**R**echerche intuitive, **E**xamen de l'environnement, **S**AFE (Analyse Séquentielle d'Élément Fonctionnel), **E**xamen des efforts, **A**analyse d'un produit de référence, **U**tilisation des normes et des règlements [9] ;
- Utilisation du DFQ (Déploiement de la fonction de qualité) qui représente un outil de planification et gestion permettant de traduire les attentes du client en exigences qu'une compagnie doit rencontrer tout en facilitant les prises de décision [2] ;
- Utilisation de la méthode AFNOR qui préconise la rédaction d'un Cahier des charges fonctionnel (CdCF). Le CdCF est un document qui sert de support principal à toutes les étapes du PDP et qui contient toutes les fonctions, leurs spécifications, leurs niveaux et leurs flexibilités [2, 9, 26].

Les critères de conception où les spécifications d'ingénierie possèdent en outre les attributs suivants :

- Elles doivent être mesurables sur le prototype où comparables à celles des produits concurrents [1-9] ;
- Elles ne doivent être reliées à aucune contrainte de conception (un critère de conception ne peut être une caractéristique du matériau ou un procédé) [3].

➤Elles doivent représenter une réponse à une attente du client [1-9, 15-17].

Lorsque tous les critères de conception ont été déduits, les ingénieurs procèdent à une classification par un diagramme d'affinité autour des composantes ou des sous-systèmes. Les notes à la conception représentent une approche développée dans le département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke par Patrik Doucet, professeur au même département. Voici donc la définition considérée la plus pertinente de cette approche:

*«Les notes à la conception sont des indications formellement intégrées au CdCF en vue de s'assurer que des fonctions, importantes pour le client, soient prises en considérations malgré la difficulté de les transposer en spécifications d'ingénierie mesurables».* [Doucet].

Donc, l'expression de leurs spécifications se fait sous forme de notes. Par exemple, pour la fonction « Paraître robuste » d'un produit ou d'une composante, le choix de formes, des couleurs et des matériaux devrait conférer au produit une apparence de robustesse et de résistance à l'usure ou à la fatigue.

**Comme il a été mentionné à la section 1.2.3 (Objectifs), la façon de classer les critères de conception présentée dans cette section, génère encore des difficultés et confusions auprès des concepteurs et auprès des étudiants. Une nouvelle approche en ce qui concerne les *critères de conception* sera présentée à la section 3.1 (Formalisation des critères de conception). Cette nouvelle approche de définition et formalisation des critères de conception permettra une classification de manière uniforme de ces derniers, afin de respecter les priorités dans le cadre du PDP. Par exemple, dans le cas d'une composante structurelle, le critère « coût » ne sera jamais analysé avant l'analyse du critère « endurance en fatigue » pour la composante conçue.**

## 2.3 Optimisation dans le cadre du PDP

L'optimisation d'un produit est un cycle continu d'expériences contrôlées sur un produit, un sous-ensemble ou sur une composante d'un produit avec un compte-rendu immédiat en ce qui concerne l'impact sur le produit. Une fois ce cycle terminé, les ingénieurs choisissent les meilleures options [27].

Pour que de nouveaux produits complexes deviennent réalité, une forte intégration est nécessaire entre le domaine des structures et d'autres domaines traditionnellement distincts, comme l'aérodynamique, les transferts de chaleur, la propulsion, la commande et l'électromagnétisme [27].

La conception et l'optimisation multidisciplinaires constituent une nouvelle approche de conception des systèmes techniques qui exploite avec cohérence la synergie de phénomènes mutuellement interactifs [28]. Le processus de conception intégré améliore la qualité de la conception et réduit la durée et les coûts de la conception. Cette approche a été largement reconnue dans l'industrie aérospatiale [29].

Une méthode très intéressante qui peut être appliquée pour optimiser un produit est l'approche axiomatique présentée par Suh [29]. Ce type d'approche est centré sur les relations entre les fonctions requises et les paramètres de conception [29-31]. La théorie de Suh est basée sur deux axiomes et quelques corolaires dérivés de ceux-ci :

**Axiome1 : Maintenir l'indépendance entre les fonctions requises.**

**Axiome2 : Minimiser le contenu d'information [29].**

Une fois que les nouvelles fonctions du produit sont définies, le processus d'optimisation consiste en deux étapes distinctes : *l'étape de créativité*, où les nouvelles idées sont synthétisées, et *l'étape analytique*, où les décisions doivent être prises en évaluant les idées proposées. Ainsi, plusieurs solutions créatives peuvent être synthétisées pour satisfaire les fonctions requises. Cependant, les calculs analytiques sont déterminants pour la validation de ces solutions et ils sont basés sur un ensemble fini de principes et de contraintes. Les deux étapes sont donc étroitement reliées et pendant ces étapes, les ingénieurs devront écarter certaines solutions et générer de nouvelles idées en explorant différentes possibilités. En ce sens, les axiomes de conception, conçus par Suh et représentant les principes de base en ce qui concerne les analyses et les décisions prises pendant le processus de conception, contribuent à l'augmentation de la créativité dans le processus d'optimisation des produits. Suh définit le processus de conception comme une cartographie entre les fonctions requises dans le domaine fonctionnel et les paramètres de conception dans le domaine physique. Cette relation entre les fonctions et les paramètres a été représentée mathématiquement sous forme matricielle [29] :

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix}$$

Ainsi, le processus d'optimisation de produit consiste à choisir les paramètres de conception appropriés pour accomplir les fonctions du produit. Ce processus peut être exprimé comme suit :

$$\{FR\} = [A] \{PC\},$$

où  $\{FR\}$  représente le vecteur de fonctions requises,  $\{PC\}$  représente le vecteur de paramètres de conception et  $[A]$  est la matrice de conception [29].

Il y a bien sûr d'autres techniques utilisées par les ingénieurs pour optimiser un produit. Jones et Ertas présentent trois techniques d'analyse d'un produit dans le but d'optimiser ce dernier :

- Analyse des fonctions et des coûts, qui consiste à décortiquer chaque composante du produit pour déterminer le coût effectif lié à l'importance des fonctions assurées par chaque composante ou sous-ensemble [32].
- Analyse de modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité-AMDEC, qui est une technique utilisée par les ingénieurs pour identifier de potentielles défaillances et leurs effets sur les composantes, les sous-systèmes et les systèmes. Ce type d'analyse fournit des informations en ce qui concerne la sensibilité des composantes ou des sous-ensembles du produit et identifie les points critiques dont l'optimisation ou même l'élimination sera justifiée [33-35].
- Méthode de Taguchi dont le principe de base est la réduction de la variabilité dans le fonctionnement du produit [35]. Pour atteindre ce but, les ingénieurs doivent comprendre très bien les facteurs qui produisent cette variabilité dans les fonctions du produit. Selon la théorie de Taguchi, la qualité du produit dépend de la réduction des variations dans les caractéristiques du produit. La différence entre la méthode conventionnelle et la méthode de Taguchi est l'interprétation différente du rapport qualité/prix. Les approches conventionnelles soutiennent que

pour une meilleure qualité, les coûts seront plus élevés, tandis que Taguchi soutient que la meilleure qualité coûte moins cher [32-35].

Selariu [36] a développé la MSM (Méthode de Séparation des Moments) pour la résolution rapide et exacte des problèmes de statique en utilisant une méthode géométrique. Généralement, dans la mécanique classique, pour résoudre ce type de problèmes on utilise la méthode d'Alembert qui implique la résolution de 6 équations d'équilibre pour les forces du système (3 équations de projection des forces sur les 3 axes du système de coordonnées et 3 équations d'équilibre des moments autour des axes du système) [36]. Il est bien connu que la résolution d'un tel système d'équations conduit à la formation d'une matrice qui permet le calcul des déterminants du système. La MSM permet d'établir toutes les forces qui agissent sur un système en équilibre, sans la résolution des systèmes d'équations d'Alembert [36]. En utilisant cette méthode, il sera possible également d'établir la place, la direction et le module de la force qui agit sur un système afin d'obtenir le ratio de transmission entre toutes les forces résultantes du système [36]. Le ratio de transmission où la fonction de transfert (FT) est notée avec «  $i$  » et avec l'indice de l'énergie transmise (forces résultantes  $\mathbf{i}_R$ , forces normales  $\mathbf{i}_N$ , la course où le déplacement  $\mathbf{i}_X$ , vitesse  $\mathbf{i}_V$ , et accélérations  $\mathbf{i}_a$ ). La fonction de transfert des forces résultantes ( $\mathbf{FT}_R \equiv \mathbf{i}_R$ ) représente le rapport entre la résultante de la force de sortie ( $R_2$ ) et celle d'entrée ( $R_1$ ) d'un système donné [36] :

$$i_R = \frac{R_2}{R_1},$$

Un exemple de l'application de la MSM est détaillé dans la référence [36] où les auteurs proposent l'optimisation d'un dispositif de fixation qui gardera le ratio de forces résultantes constant, en évitant ainsi la modification de la position d'une pièce durant le processus d'usinage.

Même si dans le cadre de ce projet de recherche l'approche MSM n'a pas été utilisée, un survol de cette dernière permet de saisir l'importance des activités d'optimisation dans le cadre du processus de développement d'un produit, d'un système, ou d'une composante.

Plusieurs approches utilisées par les ingénieurs dans le but d'améliorer une fonction d'un produit ou d'une composante ont été dénombrées dans cette section après une revue de la littérature dans le domaine de l'optimisation des produits. Dans le cadre du présent projet de recherche, un des défis sera d'intégrer dans la méthodologie de conception proposée,



des activités d'optimisation, qui pourraient être adaptées à l'industrie des produits récréatifs.

## 2.4 Conception pour « X »

Compte-tenu des nombreuses pressions qui poussent les entreprises à investir en CDP, diverses exigences en matière de conception doivent être conciliées lors des étapes d'élaboration de stratégies, de conceptualisation et de développement du processus de CDP [11-14, 37]. C'est pourquoi de nombreuses entreprises utilisent les outils de « Conception pour X » dans leurs procédés de CDP. En général, la « Conception pour X » est une approche de CDP visant à maximiser les exigences relativement au produit développé (comme l'assemblage, le démontage, la fabrication, la sécurité et l'impact environnemental) tout en réduisant les coûts [11-14]. Par exemple, compte tenu des préoccupations environnementales accrues des consommateurs, certaines entreprises canadiennes adoptent des pratiques d'éco-conception dans leurs activités afin de satisfaire leurs clients tout en augmentant l'accès aux nouveaux marchés et en diminuant les coûts.

### 2.4.1 Conception pour la fabrication

La conception pour la fabrication est importante dans le processus de conception parce qu'elle implique une réduction du nombre de composantes dans le produit et donc généralement une réduction de prix pour celui-ci [14].

Le principal objectif de la conception pour la fabrication est de générer des concepts de produits plus faciles à produire [2]. Étant donné qu'il y a plusieurs processus de fabrication dans différents domaines, il est difficile de tracer des règles universelles valables dans la conception pour la fabrication [1-9]. Donc, la meilleure façon de procéder pour les concepteurs dans ce cas est de consulter les ingénieurs de la fabrication sur les procédés de fabrication qui seront utilisés et de prendre en considération leurs conseils dans la conception du produit [39-41].

La transformation de la forme et de la taille brute d'un volume de matériau en des pièces avec les tailles, formes et finitions établies par le concepteur représente l'objectif de tout

processus de fabrication. Souvent, plus d'une méthode de fabrication est disponible pour la production d'une pièce ou d'un produit.

La sélection du meilleur procédé de fabrication peut dépendre d'un ou de plusieurs des facteurs suivants :

- 1.Type, forme et propriétés des matières premières ;
- 2.Propriétés souhaitées de la pièce finie, y compris la résistance, la rigidité, la ductilité et la ténacité ;
- 3.Taille, forme et complexité de la pièce finie ;
- 4.Tolérances requises et spécifications concernant les finitions des surfaces ;
- 5.Nombre de pièces devant être produites ;
- 6.Disponibilité et coût des biens d'équipement nécessaires ;
- 7.Coût et délais engendrés par l'outillage ;
- 8.Taux de rebut et coût de remaniement ;
- 9.Exigences de temps et d'énergie pour l'ensemble du processus ;
- 10.Sécurité des opérateurs et impact environnemental.

Généralement, tous les procédés de fabrication peuvent être considérés comme des méthodes qui servent à modifier la forme ou la taille d'une pièce par un de cinq moyens (voir le tableau 1) : (1) Flux de matière en fusion (2) Fusion des composantes (3) Déformation plastique du matériau (4) Enlèvement de matériau par usinage, où (5) Frittage de particules de métal en poudre.

Tableau 1: Caractéristiques des plusieurs catégories de procédés de fabrication [33]

| Catégorie de processus  | Symbole de la Catég. | La puissance requise du processus | Temps requis du processus | Le coût de l'équipement | Le coût de l'outillage | La résistance relative du produit | Exemples  |
|---|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|---|
| Écoulement de matière fondue (procédé de coulée)                    | C                    | Relativement faible               | Relativement faible       | Relativement élevé      | Relativement faible    | La plus faible                    | Coulée en sable<br>Coulée en moule permanent<br>Coulée centrifuge                           |
| Fusion des composantes par l'application locale de chaleur          | W                    | Modéré                            | Modéré                    | Relativement faible     | Relativement faible    | Modéré                            | Soudage à l'arc<br>Soudage au gaz<br>Soudage par friction ; etc.                            |
| La déformation plastique d'un matériau ductile (procédé de formage) | F                    | Relativement élevé                | Relativement faible       | Relativement élevé      | Relativement élevé     | Généralement la meilleure         | Forgeage au marteau<br>Forgeage à la presse<br>Extrusion ; Flexion<br>Emboutissage ; etc.   |
| Enlèvement de matière (processus d'usinage)                         | M                    | Modéré                            | Relativement élevé        | Relativement faible     | Relativement faible    | Très bonne                        | Fraisage<br>Perçage<br>Meulage<br>Sciage  |
| Le frittage de particules de métal en poudre (procédé de frittage)  | S                    | Modéré                            | Modéré                    | Modéré                  | Relativement élevé     |                                   | Soudage par diffusion<br>Frittage en phase liquide<br>Compression isostatique à chaud (CIC) |

Le choix du procédé approprié de fabrication pour chaque produit ou composante doit être pris en considération par l'équipe multidisciplinaire au début de la phase de conception [42]. Les spécifications des matériaux, la taille et la forme d'un produit, la cadence de production et les exigences de résistance ont toutes un impact sur la sélection du processus de fabrication le mieux adapté à un produit quelconque [42, 43].

À leur tour, les décisions de conception sur les détails de forme, orientation ou d'autres caractéristiques du produit sont souvent dépendantes du processus de fabrication sélectionné. La stratégie d'ingénierie simultanée appuie directement la prise de décision efficace dans ce contexte [15, 16, 43-46].

Après avoir sélectionné les matériaux et identifié les processus, et après avoir créé les formes et les dimensions du produit pour répondre aux exigences fonctionnelles et de performance, l'équipe multidisciplinaire doit examiner chaque composante de même que l'assemblage global du produit afin que ce dernier soit fabriqué avec un maximum d'efficacité [11, 12, 14, 47]. Voici la « liste de vérification » nécessaire pour la prise de décisions concernant le processus de fabrication de produits [14]:

1. Le nombre global de pièces doit être réduit au minimum ;
2. L'utilisation de pièces et composantes standardisées doit être privilégiée lorsque cela est possible ;
3. L'utilisation de composants modulaires et de sous-ensembles avec des interfaces standards doit être favorisé, lorsque cela est possible ;
4. La géométrie du produit ou de la composante devrait correspondre au procédé de fabrication choisi pour minimiser la quantité de déchets, de matériau et de temps ;
5. Les pièces où les composants doivent être conçus de façon à ce que toutes les manœuvres de montage puissent être exécutées à partir d'une seule direction au cours du processus d'assemblage ;
6. Autant que possible, les fonctions liées à la taille, à la forme et à l'arrangement des pièces dans l'assemblage doivent être complétées par des caractéristiques géométriques qui favorisent la facilité de l'alignement, la facilité d'insertion ou «l'auto localisation » durant le processus d'assemblage. Des exemples de ces

caractéristiques pourraient inclure des chanfreins bien conçus, des niches, des glissières ou des asymétries intentionnelles ;

7. Le nombre d'attaches séparées doit être minimisé en utilisant des languettes de montage, cliquets, ou d'autres géométries de verrouillage, lorsque cela est possible.

Cependant, si les concepteurs ont des difficultés à se conformer à ces directives, il sera fortement conseillé qu'ils se livrent à des consultations fréquentes avec les ingénieurs de fabrication et de matériaux.

## 2.4.2 Conception pour l'assemblage

L'application des procédures de conception pour l'assemblage peut aussi réduire les coûts tout en augmentant la qualité du produit. Mais, il y a des cas où ces procédures ne fournissent pas ces résultats. Par exemple, les ingénieurs peuvent améliorer une ou plusieurs fonctions d'un produit (donc qualité plus élevée), mais avec ces innovations, quelques pièces ou sous-ensembles du produit peuvent aussi devenir plus complexes et plus difficiles à produire [14]. Ainsi, les concepteurs doivent trouver un équilibre entre ces deux aspects importants dans le processus de conception : la qualité et le coût du produit [48, 49].

Pour obtenir un produit de qualité à un prix compétitif, les ingénieurs doivent trouver la meilleure solution qui respecte toutes les exigences identifiées : besoins du client, cahier des charges, procédés de fabrication, etc. [1-9, 48-51].

Dans une approche d'ingénierie simultanée, la tendance est de déterminer le plus tôt possible les procédés de fabrication et d'assemblage qui seront utilisés. En accélérant cette prise de décision à l'étape d'analyse des critères de conception, l'équipe multidisciplinaire peut avancer d'autant le début de la conception des outillages et la planification de la production [52, 53]. La conception pour l'assemblage a pour but la réduction des coûts d'un produit en simplifiant sa conception. Pour atteindre une efficacité d'assemblage maximale, les ingénieurs doivent prendre en considération le nombre de composantes ou de sous-ensembles qui formeront le nouveau produit [11, 14]. Il faudra donc essayer de réduire le nombre de composantes du produit, en s'assurant que les composantes qui restent peuvent être fabriquées et assemblées facilement. Pour

réduire le nombre de composantes, une première mesure qui doit être prise est de minimiser le nombre d'éléments de fixation, tout en respectant les normes d'ingénierie visant à ce que les charges puissent être uniformément réparties. Chaque élément de fixation utilisé est une composante supplémentaire dans l'ensemble : Par exemple, un boulon accompagné d'une rondelle et d'un écrou, etc. Le temps typique pour le montage d'un élément de fixation est d'environ 10-15 secondes par attache et le coût des éléments de fixation est assez élevé [14].

Une autre raison pour laquelle il est conseillé d'avoir un nombre minimal de ce type de liaison entre les composantes d'un produit est que les attaches sont des concentrateurs de charges et de possibles points faibles dans la structure du produit [14].

Les ingénieurs doivent donc se préoccuper d'avoir une composante de base pour leur concept à partir de laquelle les autres composantes seront assemblées [9, 11-14]. L'utilisation d'une composante de base peut réduire les chaînes de montage par un facteur de deux. Il n'est pas souhaitable d'avoir plusieurs mises en position de la base pendant le processus d'assemblage. Dans le cas d'un équipement automatique d'assemblage, comme des robots ou des machines spéciales pour positionner des composantes, il est très important que la base soit bien positionnée [9, 11-14, 56].

Pour les productions en série, les mises en position des composantes ont des impacts sur les coûts et le temps de fabrication. Un bon concept ne supposera pas plusieurs mises en position de la composante de base. La conception d'un produit qui compterait plus de deux mises en position serait considérée comme faible [14].

Généralement, les modes d'assemblage sont répartis en trois catégories :

- Assemblage manuel. L'avantage de ce type d'assemblage est que les outils employés sont simples et non coûteux. En plus, le coût d'assemblage est quasi indépendant du volume de production [9, 11-14].
- Assemblage par machine de transfert. Les machines de transfert sont conçues pour assembler des produits spécifiques. Ces machines ont une vocation unique (ex. positionner une pièce où une composante), leur cadence de production ne peut souvent pas être modifiée et de plus, elles n'ont pas la flexibilité d'un robot [9, 11-14].

- Assemblage robotisé. Les robots sont conçus pour travailler indépendamment et plusieurs ensembles peuvent être couplés à une chaîne de montage. Leur flexibilité, liée à la possibilité d'être programmé, permet l'utilisation de robots pour des tâches variées.

Pour que l'assemblage d'un produit atteigne un maximum d'efficacité, les ingénieurs doivent appliquer le concept de simplification qui suppose la combinaison des composantes du produit [14]. Ils doivent toujours avoir présent à l'esprit qu'en combinant deux pièces en une, on élimine ainsi une ou plusieurs opérations d'assemblage. Bien sûr, la question qui se pose est : Comment serait-il possible d'évaluer la possibilité de combiner plusieurs composantes en une composante plus grande et plus complexe ? La réponse à cette question est tributaire des conditions suivantes [14] :

- Si les composantes en cause ne sont pas conçues pour effectuer des mouvements entre elles ;
- Si les composantes n'ont pas besoin d'être isolées électriquement ou thermiquement ;
- S'il n'est pas nécessaire que les pièces soient fabriquées en différents matériaux ;
- Si la combinaison de deux ou plusieurs composantes n'empêche pas l'assemblage des autres composantes ou sous-assemblages ;
- Si l'utilisation du produit n'en est pas affectée.

Donc, si toutes les conditions énumérées ci-haut sont respectées, il sera possible de chercher une façon de combiner les composantes étudiées. [14]

### 2.4.3 Conception pour l'environnement

Il est important d'avoir des outils de conception pour l'environnement afin de minimiser les impacts du PDP sur l'environnement, mais il est également impératif que les concepteurs sachent comment intégrer ces outils au PDP [9].

Idéalement, il serait préférable que l'intégration des outils de conception pour l'environnement (ÉCV, SLCA, etc.) soit faite le plus tôt possible dans les étapes du PDP, conformément à la norme ISO-14062 [9]. Cette norme propose des actions à entreprendre pour la prise en compte des aspects environnementaux. La figure 6 synthétise quelques actions relatives aux aspects environnementaux, qui sont en lien avec les étapes du PDP

du Département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke. Illustrée dans la figure 6, la formalisation du PDP au Département de génie mécanique à l'Université de Sherbrooke a été développée par François Charon professeur au même département.

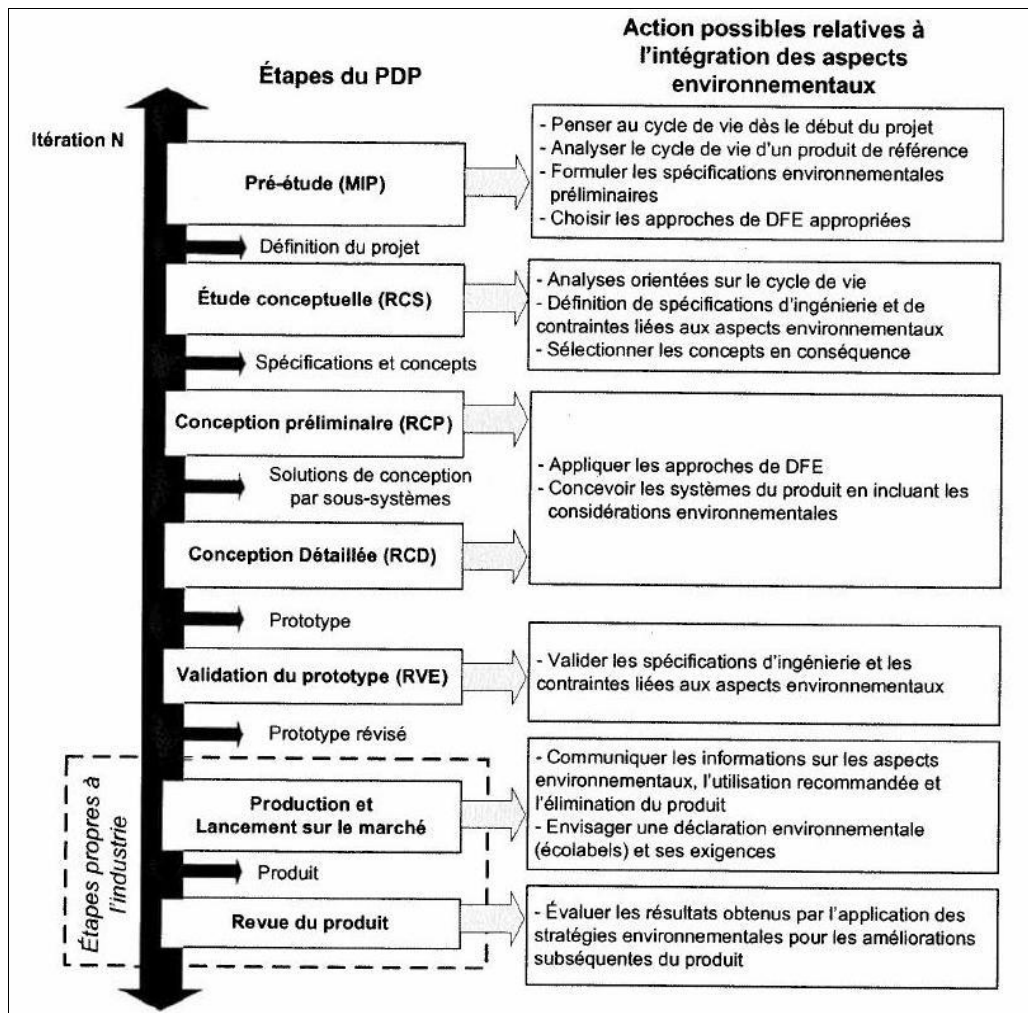


Figure 6: Schéma d'intégration des outils de conception pour l'environnement dans le PDP à l'UdeS [tiré de 9]

Plusieurs compagnies ont déjà mis en place des mesures de gestion environnementale et appliquent des outils spécifiques comme l'ÉCV (évaluation du cycle de vie) pour développer leurs produits [9, 55, 56]. Par exemple, la chaise POÄNG (figure 7), développée par IKEA est un produit conçu avec l'ÉCV. Quelques particularités du produit font de ce dernier un exemple de développement durable :

- L'utilisation de matériaux recyclés pour la fabrication du produit ;



- L'assemblage du produit pour faciliter la séparation des matériaux et permettre son recyclage à la fin de sa vie utile ;
- L'optimisation de l'encombrement des emballages pour faciliter le transport du produit ;
- L'utilisation de carton pour la majorité des emballages ;
- La prise en compte des aspects environnementaux durant le PDP.



**Figure 7: Chaise POÄNG, développée par IKEA [9]**

Même s'il y a encore des étapes à parcourir en vue d'une intégration totale des outils de conception pour l'environnement dans tous les PDP, il est possible d'affirmer que des efforts sont déployés actuellement pour réduire les impacts négatifs de la société sur l'environnement [9].

Parmi les mesures et les outils développés pour sensibiliser la société sur la nécessité d'adopter le développement durable, on compte notamment [9] :

- Les mesures à l'échelle globale pour le développement durable (Rio de Janeiro et Kyoto) ;
- Les normes ISO 14000 sur la gestion environnementale ;
- Les outils employés à l'ÉCV (logiciels, éco-indicateurs) ;
- Les technologies vertes ou propres en constante évolution ;
- Les mesures prises par plusieurs compagnies en ce qui concerne l'environnement (DFE, recyclage, récupération, etc.).

Ces mesures ne sont pas devenues la loi de l'industrie, mais elles sont de plus en plus présentes dans les PDP. Évidemment, c'est la responsabilité de tous les intervenants qui participent au développement des produits et en particulier celle des ingénieurs de favoriser l'implantation de nouvelles mentalités et de nouvelles façons de faire pour rétablir progressivement le déséquilibre environnemental créé par la présente société de consommation.

Sans aucun doute, des efforts soutenus seront nécessaires pour changer la mentalité et les habitudes des consommateurs [9, 55, 56]. Les mesures accrues de sensibilisation et les mesures législatives de plus en plus sévères en matière d'environnement (ex. : lois, amendes, taxes à la pollution, etc.) représentent la seule piste menant à une intégration totale et sans compromis du développement durable dans tous les PDP [9].

## 2.5 Validation de produits

La validation du produit est une opération destinée à démontrer qu'après avoir été soumis à différents essais, le produit est encore conforme, exception faite des essais destructifs où les ingénieurs cherchent les valeurs critiques pour lesquelles les produits subissent une défaillance [57].

L'étape de validation couvre toutes les activités liées à la recherche et au développement du produit, aux études de lots pilotes en développement, aux études de mise à l'échelle, au transfert de la technologie pour les lots à l'échelle commerciale, ainsi qu'à la conservation et à la manipulation des produits finis et en cours de fabrication [57, 58].

La validation d'un produit est une étape très importante qui implique néanmoins des coûts supplémentaires. Ainsi, l'équipe d'ingénieurs doit prendre en considération le ratio coût/bénéfice et elle doit être capable de décider jusqu'à quel niveau s'élèvent les besoins

d'une validation pour le nouveau produit [59]. Afin d'établir un certain niveau de la validation, les ingénieurs doivent d'abord comprendre les charges réelles appliquées sur le produit. Les connaissances relatives aux chargements du produit vont aider les ingénieurs à comprendre les modes de défaillances potentielles du produit. La sécurité du client doit évidemment représenter une priorité incontournable tout au long du PDP. Très rares sont les cas où l'équipe de concepteurs a le privilège de vivre une étape de validation pour un nouveau produit, sans problème ou sans itérations entre les phases de conception. La qualité, l'innocuité et l'efficacité doivent faire partie intégrante du produit. Pour atteindre ce but, il faut accorder une attention particulière à un certain nombre de facteurs, tels que la sélection de matériaux et de constituants de bonne qualité, la conception du produit et de son procédé de fabrication de même que la validation du produit lui-même [1-9].

Il n'est par ailleurs pas suffisant qu'un produit quelconque soit conforme après les tests dans le laboratoire [36]. Le produit en question doit aussi et surtout fonctionner correctement quand le client l'utilise et il doit enfin être accepté par l'utilisateur. Le bon fonctionnement d'un produit ne garantit pas l'acceptation de la part du client [36, 37]. Ce dernier ne doit pas trouver le nouveau produit juste acceptable, mais il faut que le produit plaise au client plus que les autres produits qui sont déjà sur le marché.

Selon Maropoulos et Ceglarek [38], la validation des exigences spécifiques d'un produit est un processus qui permet de veiller à ce que ces exigences soient suffisamment atteintes pour que le produit réponde aux besoins du client.

La figure 8 montre les étapes du processus de validation suivant deux dimensions différentes en parallèle : l'analyse numérique et l'analyse expérimentale. Représentée à la gauche de l'image, la validation par analyse numérique déterminera la mesure selon laquelle un modèle est une représentation fidèle du monde réel du point de vue des usages préconisés pour le modèle [38].

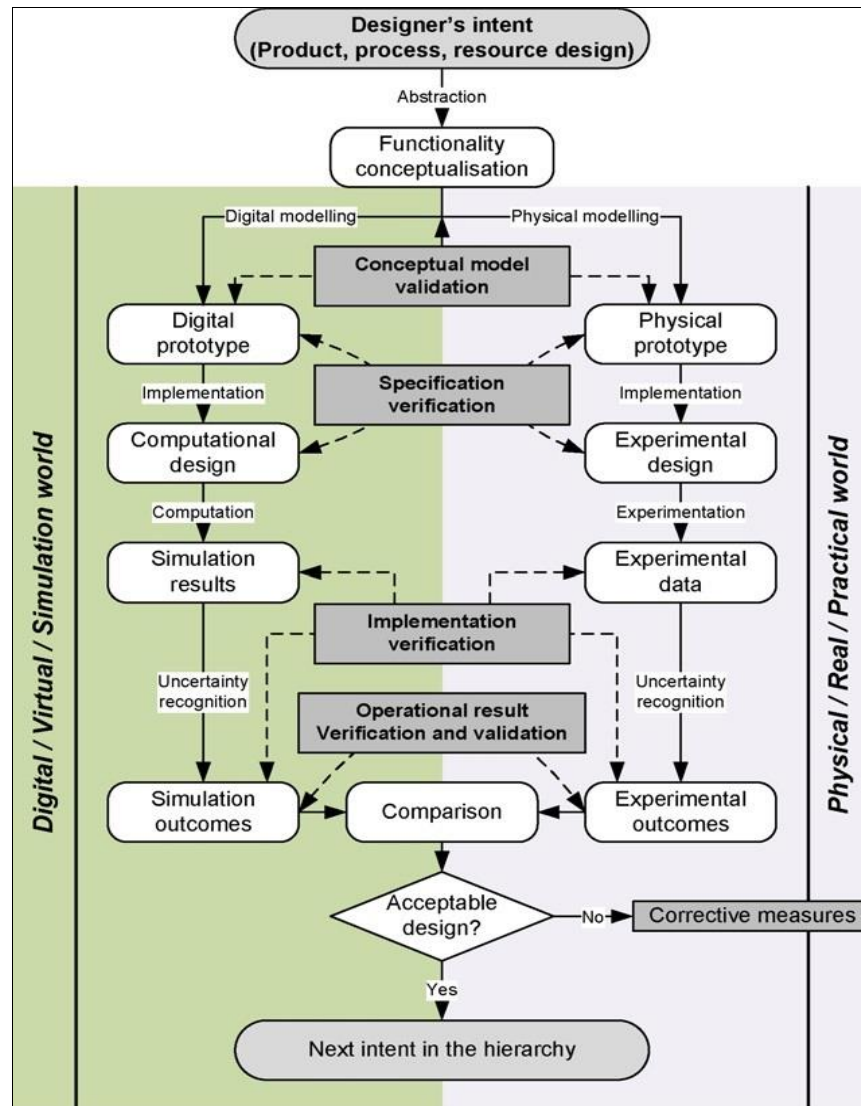


Figure 8: Validation dans deux contextes différents : numérique et physique [38]

Autrement dit, ce type de validation est un processus de confirmation par calculs et simulations que les spécifications et les performances du produit sont conformes aux attentes des utilisateurs pour des usages bien déterminés [28, 36, 38]. Veux [28] a implémenté dans l'industrie des produits récréatifs, la méthodologie de validation numérique du produit « Hot Spot » (calcul des contraintes en pied de soudure), qui a contribué à la réduction significative du temps accordé à la phase de conception détaillée dans le processus de développement du produit [28].

Huang et Kong [34] ont développé des tests selon l'approche « loss model », dont l'objectif était de réduire les variations dans le processus de fabrication avant l'étape de

lancement du produit sur le marché. L'existence d'une possible région faible du produit soumis aux diverses charges (statiques ou en fatigue), et qui pourrait être détectée même si les paramètres et les variables de conception sont dans l'intervalle de tolérance, est analysée par Huang et Kong, le but de la méthode étant d'assurer la robustesse du produit. [34].

Ceglarek et Shi [35] et East et al. [37] ont proposé l'approche « six sigma fault cause diagnosis » afin de contrôler les variations dimensionnelles du produit tout au long de sa fabrication et d'augmenter la qualité du processus de fabrication.

La validation après l'analyse expérimentale fournit la preuve objective que le produit répond à des exigences prédéterminées [37].

Cooper [6] présente les tests sur le marché (Test Markets), qui représentent la dernière manière de tester les nouveaux produits et leurs plans antérieurs de marketing, avant le lancement final. Les sujets exposés au test sont des acheteurs potentiels qui sont invités à utiliser et analyser le nouveau produit selon leurs besoins. L'objectif du test est de déterminer ou vérifier l'estimation initiale de ventes et les besoins du client pour le nouveau produit. Si les tests sur le marché montrent de faibles performances en regard des ventes et des attentes des clients, le projet peut cesser, ou encore il peut y avoir des itérations en vue de revoir le produit ou son plan de lancement [4-7].

## 2.6 Validation en fatigue des pièces structurelles

Les méthodes d'analyse de défaillance en fatigue représentent une combinaison d'ingénierie et de science [39-41, 57]. Souvent, la science ne parvient pas à fournir les réponses complètes qui sont nécessaires pour l'analyse de ce type de défaillance [43]. Mais dans des domaines tels que l'aéronautique, l'automobile ou les produits récréatifs, la fiabilité des produits reste toujours un critère qui doit se traduire par une durée de vie sans problème avec des bénéfices pour les actionnaires de l'industrie [40].

La rupture en fatigue est due à la formation et à la propagation de fissures. Une fissure de fatigue est généralement initiée à une discontinuité dans le matériau où la contrainte cyclique atteint un maximum. Les principales causes de l'apparition de fissures sont [39, 40, 60] :

- La présence de concentrateurs de contraintes dans une section de la structure (clavettes, trous, etc.)
- Les éléments de machine qui roulent ou glissent les uns contre les autres (roulements, engrenages, cames, etc.) sous une pression de contact élevée. Ce type de mécanismes provoque une usure des surfaces de contact qui peuvent alors montrer des piqûres de surface ou un effritement après un certain nombre de chargements cycliques.
- La mauvaise conception des joints et des attaches, ou leur montage erroné et les défauts de fabrication.
- La composition et les procédés de fabrication du matériau lui-même (laminage, forgeage, moulage, extrusion, traitement thermique de surface, etc.). Des surfaces microscopiques et sous microscopiques peuvent apparaître telles que des inclusions de matières étrangères ou des discontinuités de cristaux [39, 40, 60].

Lorsque l'on conçoit une structure qui sera soumise à des charges fluctuantes, il est essentiel d'estimer une courbe S-N pour le matériau candidat pour lequel le traitement thermique, la température de fonctionnement et les autres conditions d'opération correspondent aux critères de conception [60].

Bien qu'il n'y ait aucun lien direct entre la résistance statique et la résistance à la fatigue, des relations purement empiriques ont été documentées en examinant une vaste base de données existante [40, 60]. Ces observations empiriques permettent aux ingénieurs d'estimer les courbes S-N à partir de la valeur de la limite ultime en traction statique ( $S_{ut}$ ) du matériau. Ces courbes sont souvent estimées assez précisément, et sont utilisées surtout pendant la phase de conception préliminaire [39-41, 60].

Presque tous les éléments de machines fonctionnent sous des charges fluctuantes, donnant lieu à plusieurs spectres d'amplitudes de contraintes alternées et moyennes [(figure 9 et éq. (1) à (5)].

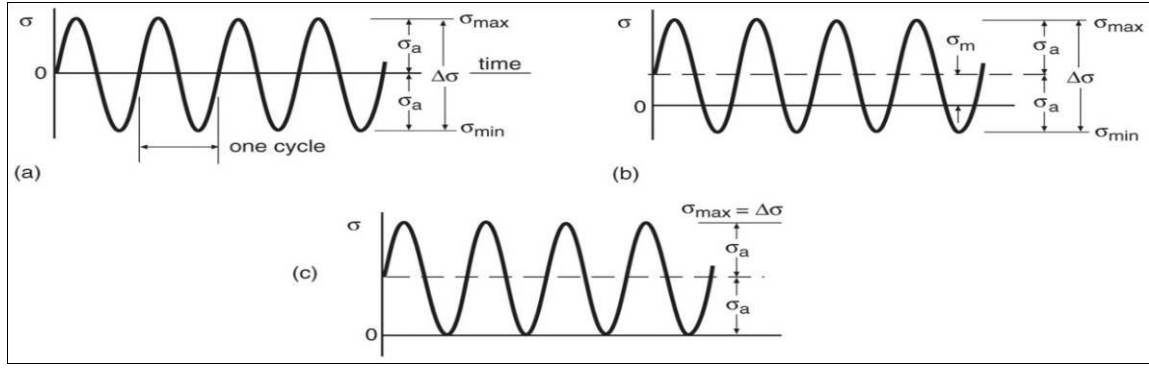


Figure 9: Types de chargements cycliques [60]

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max.} - \sigma_{min.}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max.} + \sigma_{min.}}{2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}} \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max.}}{2} (1 - R) \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max.}}{2} (1 + R) \quad (5)$$

Ce type de variations d'amplitude des contraintes alternées  $\sigma_a$  et moyennes  $\sigma_m$  rend inefficace l'utilisation directe des courbes S-N standard, parce que ces courbes sont développées pour des amplitudes constantes et pour des chargements complètement renversés [60].

Par conséquent, il devient important pour l'ingénieur de disposer d'une hypothèse (vérifiée par des observations expérimentales), afin de lui permettre de faire de bonnes estimations en ce qui concerne le fonctionnement d'un élément de machine, dans des conditions réelles de chargement, tout en utilisant les courbes S-N standards (avec l'amplitude  $\sigma_a$  constante) [60]. L'approche développée par Palmgren and Miner et illustrée dans la figure 10, représente un outil très efficace qui est souvent utilisé pour déterminer la durée de vie cumulée d'une structure après l'application de plusieurs spectres de cyclage sur cette dernière.

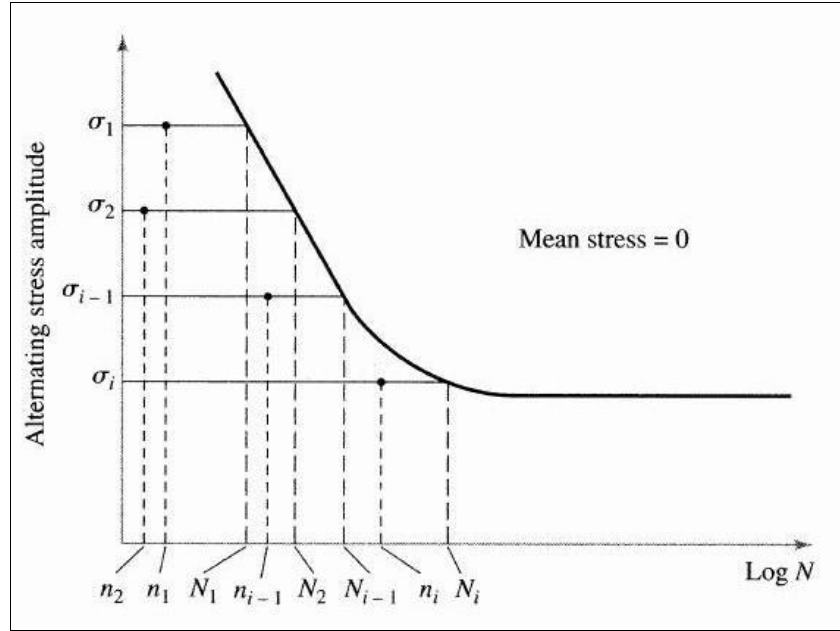


Figure 10: Illustration graphique de plusieurs spectres de chargements dans le cas de la loi de Palmgren-Miner [40, 41, 60]

Suivant la définition de la courbe S-N, le fonctionnement d'une pièce soumise à une contrainte d'amplitude  $\sigma_1$  va produire une défaillance en  $N_1$  cycles. Le fonctionnement à  $\sigma_1$  pour  $n_1$  cycles (plus petit que  $N_1$ ), va produire une fraction plus faible de dommages ( $D_1$ ). Le fonctionnement sur un spectre de plusieurs niveaux de contraintes mène à une fraction de dommages ( $D_i$ ) pour chaque niveau de contrainte ( $\sigma_i$ ). Lorsque la somme de ces fractions de dommages devient égale à 1, la défaillance est prévisible [40, 41, 60].

$$D_1 + D_2 + \dots + D_i \geq 1 \quad (6)$$

Palmgren et Miner affirment que la fraction de dommages ( $D_i$ ) à tout niveau de contrainte ( $\sigma_i$ ) est linéairement proportionnelle au rapport entre le nombre de cycles de fonctionnement ( $n_i$ ) et le nombre total de cycles ( $N_i$ ) qui produirait la défaillance à ( $\sigma_i$ ).

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (8)$$

Généralement, les autres théories d'accumulation de dommages qui sont beaucoup plus complexes ne fournissent pas une amélioration significative en termes de fiabilité et de prédiction de défaillances [60]. La seule lacune de la théorie de Palmgren-Miner est



qu'aucune influence de l'ordre d'application des différents spectres de chargement n'est reconnue et les dommages sont supposés s'accumuler à la même vitesse sans égard à l'historique d'application des cycles de chargements [60].

La plupart des situations de conception impliquent des chargements fluctuants qui produisent des contraintes cycliques multiaxiales. Aucun consensus n'a toutefois été établi en ce qui concerne la meilleure approche à utiliser pour prédire une défaillance à la suite de l'application de contraintes cycliques multiaxiales. Cependant, une technique appropriée pour les matériaux ductiles soumis à des contraintes multiaxiales serait l'utilisation d'une adaptation cyclique de l'équation de la contrainte équivalente de Von-Mises [60].

Ainsi, l'expression d'une contrainte alternée uniaxiale équivalente pour les matériaux ductiles, basée sur la théorie de l'énergie de distorsion sera [40, 41, 60] :

$$\sigma_{eq-a} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau^2} \quad (9)$$

L'expression d'une contrainte moyenne uniaxiale équivalente pour les matériaux ductiles, basée sur la théorie de l'énergie de distorsion sera [40, 41, 60]:

$$\sigma_{eq-m} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau^2} \quad (10)$$

Les contraintes équivalentes indiquées ci-dessus peuvent être extrapolées dans la formule de Gerber afin d'obtenir la contrainte équivalente complètement renversée qui induirait une défaillance en fatigue.

$$\sigma_{eq-CR} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (11)$$

Avec cette approche, les ingénieurs peuvent faire une estimation assez précise de la durée de vie d'une pièce structurale, tout en utilisant une courbe S-N standard (traction-compression). Ces formules seront également utilisées afin de déterminer la contrainte équivalente à l'étape de validation physique des chargements.

## 2.7 Validation des procédés de fabrication

L'étape de conception détaillée commence une fois que le concept final a été choisi. Après avoir analysé les caractéristiques de plusieurs concepts proposés, les ingénieurs choisiront le concept gagnant qui répond à tous les critères de conception établis aux étapes précédentes.

En parallèle avec la génération des plans détaillés pour le concept choisi, une analyse approfondie de plusieurs procédés de fabrication et d'assemblage sera requise pour le concept final afin de trouver le meilleur rapport qualité/prix parmi les procédés proposés [48]. Ainsi, parmi les procédés de fabrication explorés, on a retenu pour la convergence finale, les procédés suivants :

- **L'hydroformage** (figure 11) est un procédé de fabrication par déformation plastique pour des pièces d'épaisseur faible (plaques ou tubes). Contrairement au matriçage, la matrice complémentaire est remplacée par la pression du fluide qui contraint la pièce à prendre la forme de l'empreinte de la matrice [10, 14, 48].

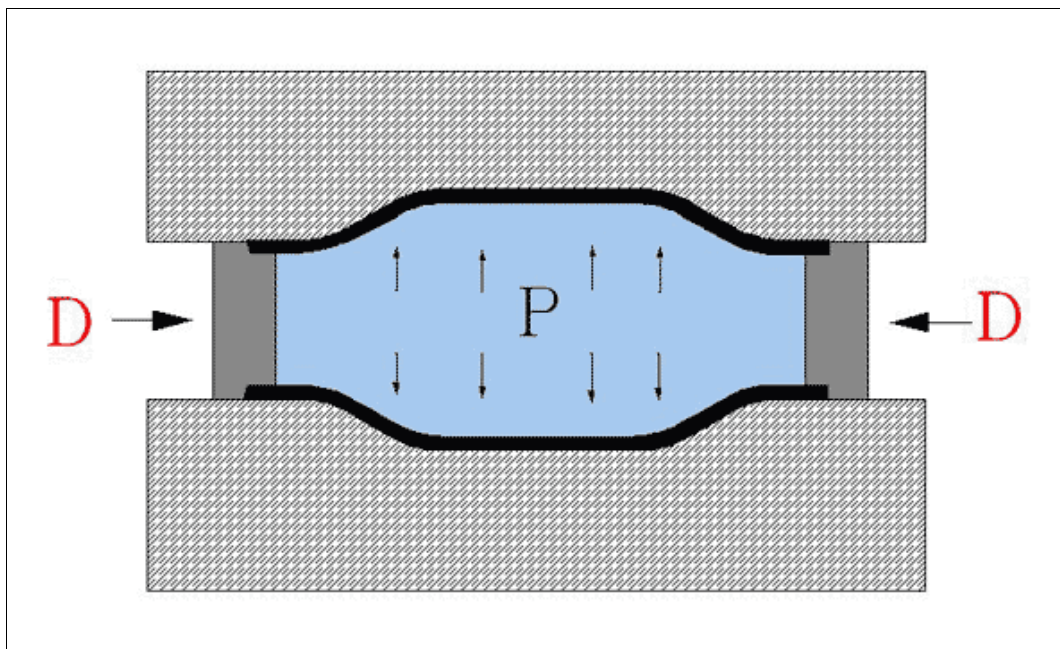


Figure 11: Schéma de principe de l'hydroformage

Les matériaux pouvant être utilisés pour ce procédé sont très diversifiés. La spécification commune des matériaux hydroformés est un module d'élasticité qui doit être le plus petit possible, évitant ainsi une déformation de « relaxation » lorsque la pression est relâchée.

Dans les lignes suivantes, on dénombre quelques avantages notables de l'hydroformage [14] :

- A. Le processus de fabrication à long terme devient très économique parce qu'aucun consommable n'est requis, sauf le lubrifiant qui doit être disposé entre la pièce et la matrice à chaque cycle ;
- B. Il n'y a pas de pertes de matière, donc un très grand avantage lorsqu'on modélise des pièces faites en matériaux ou alliages spéciaux ;
- C. Les pièces hydroformées présentent un très bon état de la surface et leurs caractéristiques mécaniques sont meilleures qu'avec d'autres procédés, notamment le comportement en fatigue qui dépend beaucoup de cet aspect ;
- D. Des structures composées de plusieurs pièces soudées peuvent ainsi être obtenue en une seule étape par hydroformage, réduisant ainsi les étapes de fabrication et d'assemblage ;
- E. Excellent rapport rigidité/poids.

➤ **L'extrusion** (figure 12) est généralement le moyen le plus économique de fabriquer des pièces qui ont une section transversale constante comme dans le cas des poutres qui forment le châssis du véhicule à trois roues [61]. Il ne faut pas confondre ce procédé avec le tréfilage ou l'étirage qui consiste aussi à faire passer un matériau dans une filière, mais sous l'effet d'une traction.

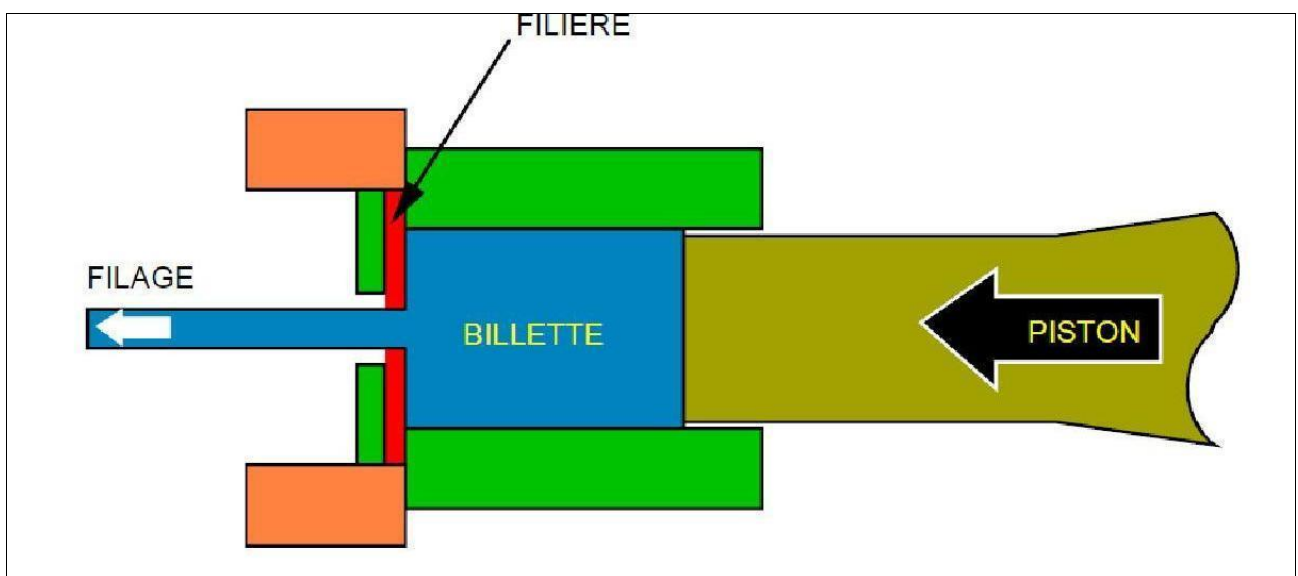


Figure 12: Schéma de principe de l'extrusion

Les pièces réalisées avec ce procédé présentent des formes plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage et leur état de surface est excellent, ce qui permet souvent d'éviter l'usinage complémentaire. Le filage par extrusion permet d'obtenir des barres de sections très variées et des tubes, ce qui rend pertinente l'applicabilité du procédé à la fabrication du châssis du tricycle. Ainsi, quelques avantages du procédé ont été identifiés [10, 14] :

- A. Productivité élevée, généralement comprise entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de pièces par quart de travail ;
- B. Économie de matériau par rapport à d'autres techniques telles que le forgeage à chaud ou l'usinage ;
- C. Tolérances précises (jusqu'aux dixièmes de mm) et bon état de surface (rugosité de 1 à 5  $\mu\text{m}$ )

L'utilisation de ce procédé présente également quelques inconvénients qui seront pris en considération avant la décision finale sur les choix du procédé de fabrication [10, 14] :

- A. Réalisation et mise au point des outillages souvent onéreuse, amortissable uniquement sur de grandes quantités de pièces ;
- B. Nécessite des installations complémentaires de débitage ;
- C. Nécessite des traitements de surface.

➤ **L'Étirage à froid** (figure 13) consiste à exercer une contrainte de traction sur une barre ou fil-machine, pour l'obliger à passer à travers une filière fixe. À la sortie de la filière, le produit présente une section conforme à l'orifice de celle-ci [10, 14].

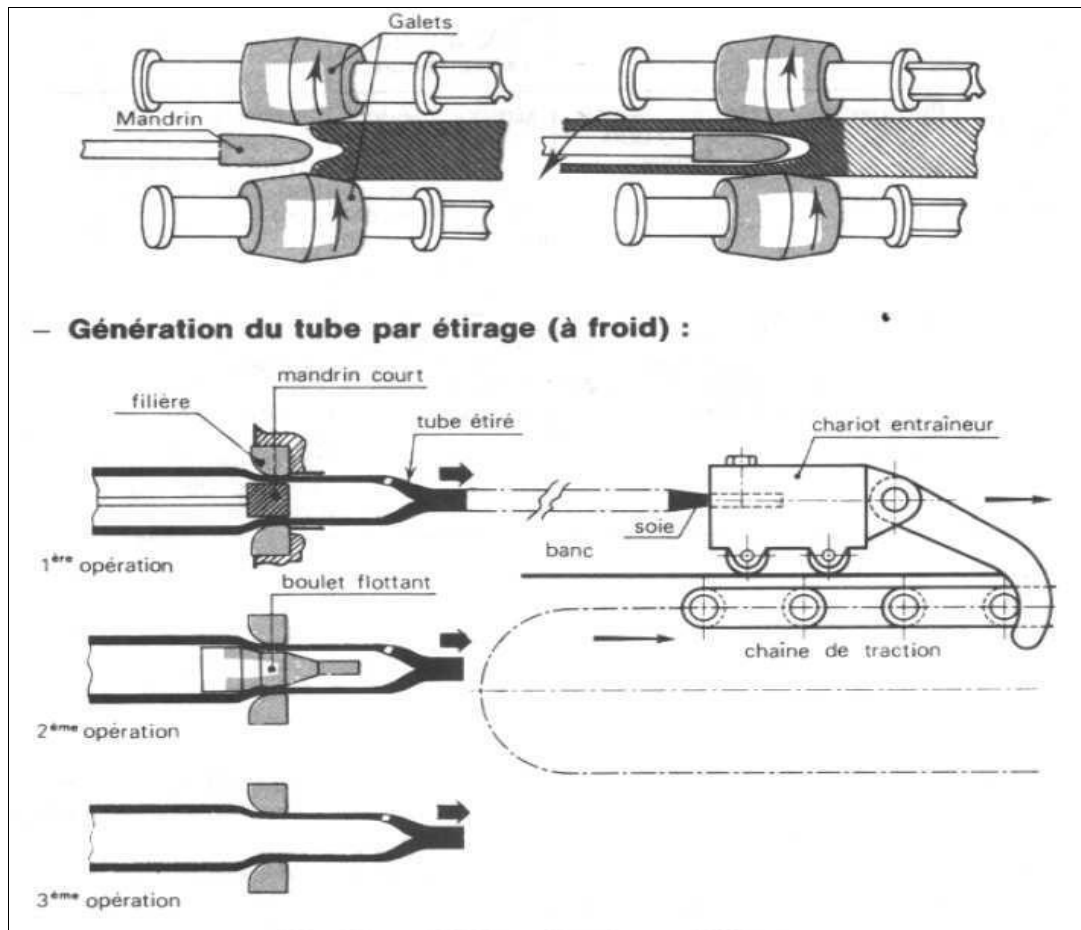
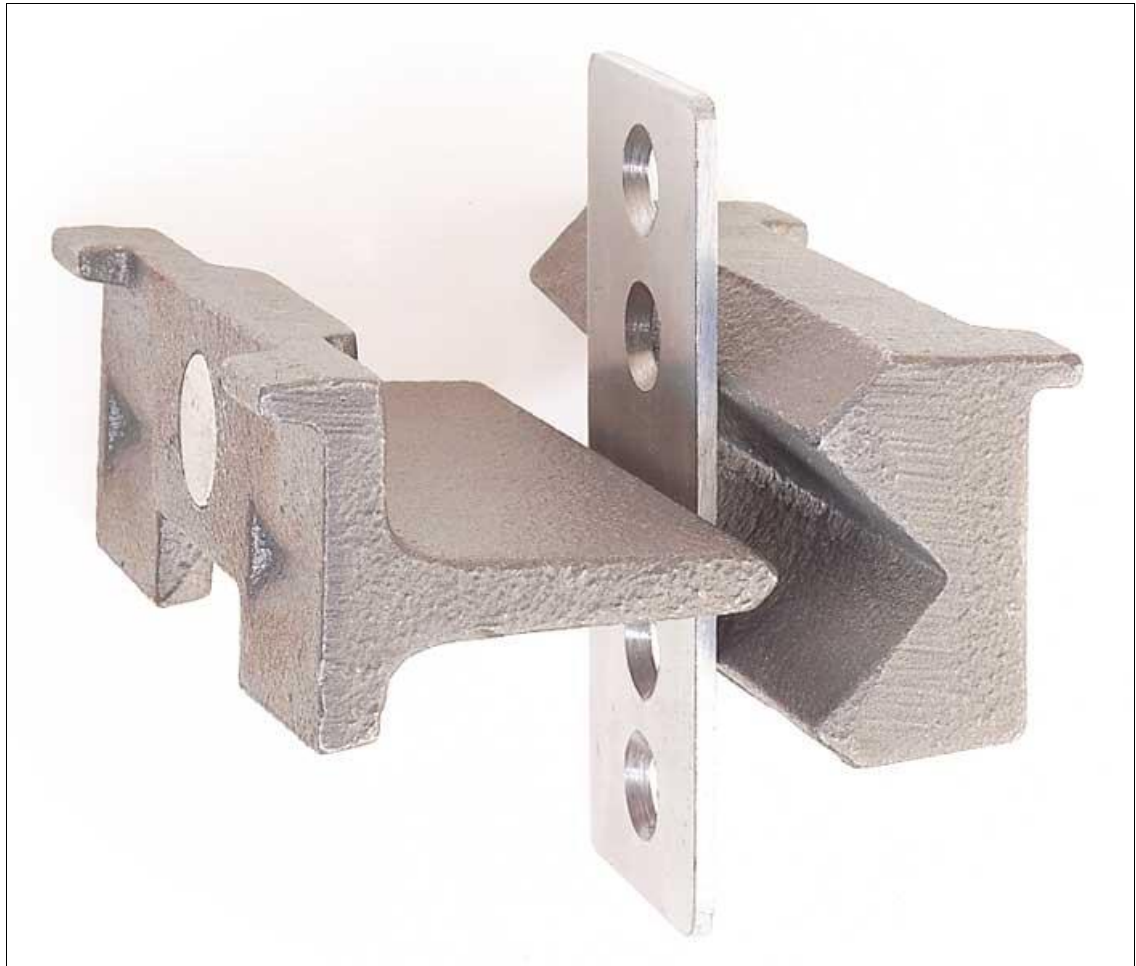


Figure 13: Schéma de principe de l'étréage

L'étréage, constituant de par sa nature une épreuve de résistance à la traction, ne convient pas à tous les types de métaux. Ceux-ci doivent présenter une bonne résistance à la traction et une bonne homogénéité de structure, car le moindre défaut interne peut provoquer la rupture de la barre. Les sections obtenues par étréage sont très diverses et précises (tolérances d'environ  $\pm 0,1$  mm) [10, 14, 48, 60]. Grâce à cela, on peut obtenir, d'une manière économique, des pièces à partir d'une barre étréée au profil désiré, par tronçonnage ou par perçage. Les avantages et les inconvénients de l'étréage sont très semblables à ceux de l'extrusion, mais le niveau d'atteinte des critères d'évaluation pour chaque procédé sera décisif dans la prise de décision finale [14].

➤ **Le pliage** (figure 14) s'applique généralement au produit laminé (plaque, feuille, barre et tige) son objectif étant de produire un pli d'un angle précis, à un endroit précis, sur une pièce métallique éventuellement prédécoupée [10, 14].



**Figure 14: Schéma de principe du pliage**

À la suite du processus de pliage, le métal subit une déformation maximale en tension. Le rayon de pliage minimal, qui peut être imposé par les outillages, dépend de l'élongation maximale  $A$  (%) pouvant être supportée par l'alliage à la température de l'opération. Les alliages d'aluminium dur ont des élongations plus faibles que l'acier et il faut donc en tenir compte lors de la conception des matrices de pliages [10, 14, 61].

La plus grande contrainte engendrée par ce procédé est le rayon de pliage minimum. Lorsque le rayon est plus grand que trois fois l'épaisseur  $e$  du métal, le rayon minimum de pliage  $R_p$  est donné par :

$$R_p = \epsilon * \frac{(100-A)}{2 * A} \quad (12)$$

Cependant, pour des rayons plus courts, il vaut mieux, pour chaque matériau, respecter les recommandations qu'on retrouve dans la littérature et valider le résultat par des simulations numériques (AÉF) ou par des essais en laboratoire (si des outils informatiques ne sont pas disponibles). Des rayons d'appui plus généreux et mieux polis, de même que l'utilisation d'un film plastique, aideront à prévenir l'endommagement des surfaces devant conserver une bonne qualité. Comme dans le cas de l'hydroformage, lors du pliage d'une pièce à un angle imposé par l'outillage, il y aura un retour élastique lors du retrait du poinçon. Conséquemment, l'angle final obtenu diffèrera de celui imposé par l'outillage, de la valeur correspondant à ce retour élastique.

Après avoir identifié les procédés de fabrication, les concepteurs effectueront une analyse des procédés d'assemblage [10, 14, 48]. Ainsi, plusieurs pistes seront explorées dans ce sens, l'objectif de cette analyse étant de choisir le procédé d'assemblage le plus approprié pour notre application :

#### ➤ **Soudage ;**

Avantages [11, 12, 14, 61] :

- A. Assure une continuité métallique des pièces, leur conférant de bonnes caractéristiques mécaniques au niveau de l'assemblage ;
- B. Bonne distribution des contraintes dans la liaison ;
- C. Prix relativement bas, par rapport aux autres procédés candidats ;
- D. Présente un bon comportement en fatigue et assure la rigidité de la liaison.

Inconvénients [11, 12, 14, 61] :

- A. Les défauts de fusion et manques de pénétration ne sont pas toujours visibles à l'œil nu ;
- B. C'est un type de liaison nécessitant souvent l'emploi de méthodes de contrôle complémentaire ;

- C.Des fissures peuvent apparaître au cours du refroidissement sous l'effet de contraintes résiduelles ;
- D.On ne peut pas souder deux matériaux différents.

### ➤Boulonnage

Avantages [11, 12, 14, 61] :

- A.Liaison pouvant être facilement désassemblée au besoin et facile à réparer ;
- B.La transmission des efforts s'effectue par l'adhérence des pièces en contact.  
Sous l'effort de serrage et grâce à la résistance au frottement des pièces en contact, les éléments assemblés ne peuvent pas glisser ;
- C.Peut-être utilisé pour des liaisons entre plusieurs combinaisons de métaux.

Inconvénients [11, 12, 14, 61] :

- A.Répartition inégale des contraintes et des vibrations ;
- B.Augmente le nombre de composantes et le poids du véhicule ;
- C.Coût relativement élevé de ce type d'assemblage ;
- D.Dans le cas d'une structure soumise à plusieurs types de chargements multiaxiaux, ce type d'assemblage nécessite des analyses plus approfondies en ce qui concerne le choix des boulons (portance vs friction).

### ➤Collage

Avantages [11, 12, 14, 61] :

- A.Assure une bonne rigidité des joints ;
- B.Bonne distribution des contraintes dans la liaison ;
- C.Peut-être utilisé pour des liaisons entre plusieurs combinaisons de métaux ;
- D.N'induit aucun affaiblissement des pièces assemblées (pas de trous à percer) ;
- E.Meilleure tenue à la fatigue que les assemblages rivetés, boulonnés ou soudés par points ;



F. Propriétés élastiques des colles ou des mastics permettant d'amortir les vibrations dans certains cas ou de tolérer des variations dimensionnelles (collage de métaux sur d'autres matériaux de coefficients de dilatation différents).

Inconvénients [11, 12, 14, 61] :

- A. Type d'assemblage mal connu par les industriels et les mécaniciens (on ne sait pas « *comment ça colle* ») ;
- B. Nécessite une conception adaptée des pièces et des assemblages ;
- C. Nécessite une bonne préparation des surfaces, ainsi que la planéité et la propreté de ces dernières ;
- D. Le collage présente une sensibilité à l'humidité et des risques de corrosion si la préparation des surfaces n'est pas satisfaisante ;
- E. Longue durée de durcissement (10 à 20 heures) exigeant des températures relativement élevées (entre 120 et 170 °C).

### ➤ Rivetage

Avantages [11, 12, 14, 61] :

- A. Moins coûteux que l'assemblage par boulonnage ;
- B. Peut-être utilisé pour des liaisons entre plusieurs combinaisons de métaux ;
- C. Opération d'assemblage simple et rapide ;
- D. Permet des liaisons pivotantes ;
- E. Possibilité d'automatisation du processus.

Inconvénients [11, 12, 14, 61] :

- A. Les liaisons créées ne sont pas démontables sans abimer les rivets ;
- B. La majorité des rivets n'ont pas une très grande résistance à la corrosion après l'opération de sertissage ;
- C. Même si à court terme les caractéristiques mécaniques du châssis ne seront pas compromises par la corrosion, celle-ci peut entraîner l'apparition de traces de rouille au niveau du rivet ;
- D. Le revêtement appliqué afin de protéger le joint riveté présente le risque d'un craquèlement lors de la déformation de la structure.

Une analyse plus approfondie de ces critères a été faite par Yann Mogenot [91]. La mise en œuvre des outils de sélection des procédés de fabrication et d'assemblage faisant l'objet de ses recherches.

Dans le cadre du projet de développement du nouveau châssis pour le véhicule récréatif à trois roues, l'analyse des procédés de fabrication et d'assemblage a été faite parallèlement à l'analyse numérique en fatigue du concept choisi, ce qui souligne la dimension simultanée du PDP utilisé.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION ET VALIDATION DE PRODUITS

Dans ce chapitre quelques approches théoriques ont été développées pour répondre au besoin (identifié suite à l'étude de la littérature) d'intégrer et de formaliser les activités de validation à la phase de conception détaillée. Dans une première section, quelques définitions ont été développées afin de mieux vulgariser les aspects liés à la conception et à la validation dans le cadre du PDP. La synthèse de ces approches est illustrée par le tableau 2. À partir de ce tableau, des méthodologies détaillées de conception et de validation ont pu être développées en fonction de plusieurs contextes de développement de produits (voir l'article 4 de l'annexe E).

### 3.1. Formalisation des méthodes de conception et de validation

Le tableau 2 a été construit pour répondre aux besoins énumérés à la section 1.1 « Mise en contexte et problématique ». Le besoin d'intégrer et de formaliser les activités de validation à la phase de conception détaillée a été identifié autant dans les milieux industriels qu'académiques. La nécessité d'améliorer la communication et le transfert d'information entre tous les acteurs impliqués dans le processus de développement de produits nous amène à intégrer un langage commun décrivant les diverses activités de conception et de validation de produits.

Tableau 2: Sélection de méthodologies de conception et validation de produits

| Critères de conception |  | Méthodologies de conception/validation             |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|------------------------|--|--|---|--------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|---|---|-----------------------------|--|
|                        |  | Quantitatifs de 1er rang                           |   | Quantitatifs de 2ème           |                                      | Qualitatifs                                     |                                |   |   |                             |  |
|                        |  | Durée de vie                                       | Rigidité  | Limite ultime                  | Déflexion                            |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  | A1a ou A2a; N1a ou N2a; E1(x); P1(x) ou P2(x); VC1 | A1a ou A2a, N1a ou N2a; E1a ou c; P1a ou c; VC1 | N1a ou N2a; E1b ou d; P1b ou d | A1b ou A2b; N1b ou N2b; E2(x); P2(x) | A1b ou A2b; N1b ou N2b; E2a ou c; P2a ou c; VC2 | N1b ou N2b; E2b ou d; P2b ou d | A1b ou A2b; N1b ou N2b; E2b ou d; P1(x) | A1b ou A2b; N1b ou N2b; P1a ou c; VC(x) | N1b ou N2b; E2b ou d; P1(x) |  |
|                        |  | VÉ1  |   |                                | VÉ2                                  |   |                                | VÉ(x)                                   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  | Esthétisme   | A1a ou A2a; VC1 ou 2; VD; VO                    | X                              | A1a ou A2a; VC1; VD; VO              | A1b ou A2b; VC2; VD; VO                         | X                              | A1b ou A2b; VC(x); VD; VO               | X                                       | A1b ou A2b; VC(x); VD; VO   |  |
|                        |  | Assemblage   |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  | Fabricabilité                                      |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  | Environnement                                      |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |
|                        |  |  |   |                                |                                      |   |                                |   |   |                             |  |

Le tableau de sélection représente une synthèse des types d'activités menées à la phase de conception détaillée et de validation de produits en fonction des critères de conception établis à la phase de conception préliminaire et du type de produit. On identifie dans le tableau de sélection trois blocs en étroite interaction : (1) Critères de conception (2) Types de produits et (3) Méthodologies de conception/validation.

### 3.1.1 Types de critères de conception ou de spécifications de produits

À la gauche du tableau 2, quelques critères de conception propres à l'industrie des produits récréatifs ont été choisis, mais il sera possible d'en ajouter d'autres. Pour mieux organiser les étapes d'analyse de critères, ces derniers ont été classifiés en trois catégories : (1) *critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang* (2) *critères quantitatifs de 2<sup>e</sup> rang* et (3) *critères qualitatifs*.

On a défini les *critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang*, comme étant les critères mécaniques quantifiables ayant une influence directe sur la sécurité du client ou sur l'intégrité du

produit tout au long de sa durée de vie. L'analyse de ce type de critères va toujours engendrer un facteur de sécurité pour s'assurer que l'utilisation du produit sera faite tout en protégeant

l'utilisateur et en respectant les normes de sécurité en vigueur. Le facteur de sécurité représente un paramètre de conception complémentaire qui peut varier en fonction du niveau d'informations disponibles et de l'exactitude de ces dernières.

Ensuite, les *critères quantitatifs de 2<sup>ème</sup> rang* sont les critères de conception qui touchent plutôt à la dimension économique du produit. Ils sont très importants pour le succès du produit sur le marché et l'analyse de ces critères sert à établir si les solutions fonctionnelles trouvées sont économiquement viables, tout en respectant les critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang. Afin d'éviter le contournement de certains critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang, il est très important de ne pas effectuer l'analyse des critères quantitatifs de 2<sup>ème</sup> rang avant l'analyse de ceux de 1<sup>er</sup> rang.

Les *critères qualitatifs* sont définis comme étant les critères de conception non quantifiable d'un produit, comme par exemple la fabrication, l'assemblage, le recyclage ou l'esthétisme. Comme le tableau 2 le montre, cette catégorie de critères intègre le paradigme « Design for X » dans le processus de conception. Comme les autres catégories de critères mentionnés ci-haut, les critères qualitatifs jouent un rôle très important à l'étape de convergence des concepts. En intégrant l'analyse des critères qualitatifs dans le flux d'activités du processus de conception, les équipes multidisciplinaires seront familiarisées très tôt avec ce paradigme. Ainsi, le nombre d'erreurs dépistées à la phase de prototypage ou même sur les chaînes de production/assemblage sera réduit de manière significative.

### 3.1.2 Types de produits

Toujours dans le tableau de sélection présenté à la section 3.1, plusieurs combinaisons pertinentes (**non exhaustives**) de caractéristiques d'un produit ont été identifiées. En fonction de ces caractéristiques, les concepteurs choisiront la méthodologie de conception/validation la plus appropriée. Premièrement, on identifie trois catégories principales : (1) Nouveau produit, (2) Évolution d'un produit existant et (3) Produit adapté. Ensuite, pour chaque catégorie de produit mentionné ci-haut, plusieurs

caractéristiques additionnelles ont été ajoutées afin de bien déterminer le profil du produit.

Dans le contexte du présent document, « *Nouveau Produit* » représente le résultat d'un projet qui commence avec les premières étapes du processus de conception (soit la segmentation du marché et l'analyse des besoins du client) et qui se termine après les dernières activités de validation sur le marché. Qui plus est, le « Nouveau Produit » correspond au développement de nouvelles caractéristiques, de nouvelles spécifications techniques, de nouvelles matières ou d'autres caractéristiques fonctionnelles pour un produit donné. Dans ce cas, d'autres produits concurrentiels pourraient donc exister sur le marché.

Contrairement aux nouveaux produits, les produits qui représentent une « *Évolution d'un produit similaire* » sont des produits qui ont été modifiés ou optimisés en leur ajoutant de nouvelles fonctions ou simplement une nouvelle géométrie à partir d'un produit de référence qui existe déjà. Pour exemplifier ces définitions, on considère une « Évolution d'un produit similaire » le « face-lift » d'un projecteur d'un véhicule. Mais si l'équipe multidisciplinaire est chargée de changer le projecteur actuel d'une voiture par une nouvelle génération de projecteur (remplacer le phare halogène par un phare avec loupe), là c'est le cas d'un « Nouveau Produit ».

De la deuxième situation de conception identifiée (*évolution d'un produit similaire*) en découle la situation de conception où les concepteurs adaptent le produit en fonction de plusieurs niches de clients. Par exemple, le développement d'un véhicule à trois roues pour les enfants ferait partie de ce type de produits. On appelle donc cette situation « Adaptation de produit ». La configuration conceptuelle resterait inchangée et au niveau de cas de chargements, d'analyse des critères ou encore au niveau des niveaux de validation, les concepteurs seraient en mesure d'appliquer une approche relative en effectuant un « bench-marking » sur le véhicule de référence (développé initialement).

Dans une première étape, les concepteurs devraient établir si le produit développé est une pièce *structurale* du véhicule ou si c'est plutôt une pièce *esthétique* de ce dernier. Ainsi, un produit pourrait être structural et esthétique en même temps (la carrosserie), il pourrait aussi être uniquement structural (le châssis) ou encore il pourrait être simplement

esthétique (le projecteur). Un produit structural nécessite une analyse des chargements et le calcul d'un facteur de sécurité, tandis qu'un produit esthétique ne subira pas de chargements mécaniques, mais plutôt des chargements environnementaux (rayons du soleil, pluie, gel/dégel, etc.).

Toutefois, si on prend en considération seulement ces premières caractéristiques, la plage de produits sera trop large et il sera très difficile d'envisager une méthodologie pour chaque produit. Pour exemplifier l'idée, on considère deux produits différents : un châssis et un bras de direction. Les deux sont des produits structuraux, mais la complexité d'un châssis est beaucoup plus élevée que celle d'un bras de direction. Ainsi, pour un produit *complexe*, les analyses de critères et les simulations seront faites numériquement, tandis que pour un produit *simple*, des calculs analytiques suffiront pour arriver à une solution convenable. Il faut donc développer davantage le profil du produit en établissant aussi son degré de complexité, afin de choisir la meilleure méthodologie de conception et validation.

L'aspect économique joue également un rôle très important dans le processus de développement de produits et les ingénieurs doivent, dès le début du projet, veiller sur les dépenses engendrées par le produit à toutes les étapes de son processus de développement. La complexité des produits peut influencer leurs coûts, mais il ne faut pas évaluer les coûts d'un produit juste en fonction de la complexité de ce dernier. Par exemple, on pourrait avoir un produit simple, mais une contrainte de conception, comme le choix du matériau, pourrait rendre le produit *coûteux*. Dans un tel cas, une analyse économique plus approfondie sera requise. Par contre, si le coût du matériau, de l'outillage ou des procédés de fabrication n'est pas élevé, le produit développé sera identifié comme un produit *bon marché* même si sa géométrie est complexe.

Les degrés de liberté pendant son fonctionnement représentent un autre critère qui peut être employé pour classer un produit. Ainsi, on considère deux nouvelles caractéristiques très utiles pour faire le choix des méthodologies de conception les plus appropriées. Contrairement à un produit *mobile*, la maquette numérique d'un produit *fixe* ne nécessitera pas de simulations dynamiques pour la vérification numérique de son fonctionnement. En plus, dans le cas d'un produit mobile, la complexité des travaux

d'ingénierie au niveau du calcul des charges et des tolérances pour certaines composantes sera plus élevée que pour un produit fixe.

Finalement, la dernière caractéristique qui sera utilisée pour le « façonnage » du profil d'un produit est basée sur le flux de production (nombre d'items) après le lancement du produit sur le marché. Ici on identifie cinq cas : (1) *Série réduite*, (2) *Grande série*, (3) *Prototype+Série réduite*, (4) *Prototype+Grande série* et (5) *Prototype*. Ces caractéristiques possibles du produit fournissent aux ingénieurs la possibilité de mieux anticiper les dépenses et les délais dans le processus de développement du produit. Par exemple, pour un produit de grande série (plus de 100000 items) les ingénieurs devraient prévoir une durée de vie appropriée pour les outillages (moules d'injection, outils de pliage ou découpage, etc.) ou même leur remplacement. Qui plus est, si un prototype s'impose aux étapes de conception, les dépenses et les délais du processus de développement pourraient augmenter en fonction de la complexité du produit. Les cas où les produits sont uniquement sous la forme d'un prototype sont très rares dans l'industrie des produits récréatifs. Généralement, le produit-prototype est l'outillage (moule d'injection), et non pas le sous-système ou le produit récréatif proprement dit (guidon, projecteur, moteur, frein, etc.). Par contre, il y a des clients qui peuvent avoir des besoins très particuliers et le constructeur peut y répondre en fabriquant un produit unique, donc un produit-prototype.

### 3.1.3 Types de méthodes de conception et validation

Le troisième bloc du tableau fournit l'information concernant les méthodes de conception et validation appropriées correspondant aux types de produits et aux critères de conception choisis. Toutes les méthodes ont été symbolisées afin de les encadrer dans la partie médiane du tableau et une légende a été créée pour fournir l'information nécessaire concernant les symboles utilisés dans le tableau.

Dans la légende, on remarque huit catégories principales de méthodes de conception et validation :

- 1) Numériques (N) (*CAO et simulations par éléments finis*),
- 2) Analytiques (A) (*calculs, dimensionnement et hypothèses liés à la configuration d'un produit ou d'une composante*)



- 3) Expérimentales (E) (*essais en laboratoires*),
- 4) Physiques (P) (*essais dans des conditions réelles d'utilisation*),
- 5) Économiques (VÉ) (*calculs des coûts reliés aux activités de conception et validation*),
- 6) Basées sur les perceptions client (VC) (*essais et analyses effectués avec le client*),
- 7) Dimensionnelle (VD) (*procédures de validation liées à la conformité isométrique et géométrique du produit*),
- 8) Basées sur les outils et procédés de fabrication (VO) (*conception et validation des outils et des procédés de fabrication utilisés pour la mise en production d'un produit ou d'une composante*).

Tout d'abord, une rétroaction serait très utile concernant les termes « absolue » et « relative » dans la légende du tableau. Ainsi, on considère une méthode de conception/validation absolue (1) quand les chargements et les critères sont calculés ou approximés sans avoir un produit de référence sur le marché. Par contre, une méthode de conception/validation devient relative (2) quand les critères de conception sont établis sur une base comparative, après l'étude d'un produit similaire qui existe déjà sur le marché et qui répond très bien aux besoins du client.

Les termes « *Statique* » et « *Dynamique* » sont utilisés pour fournir une information générale en ce qui concerne les types d'activités effectuées à l'intérieur d'une étape de conception/validation avec leur complexité et délais respectifs. Dans le contexte du projet de recherche, les méthodologies de conception/validation en *statique* (notées avec «S» dans la légende du tableau 2), concernent les calculs, les analyses et les essais d'un modèle numérique ou expérimental pour lequel on considère nulles, les sommes de forces et de moments extérieurs. Toujours dans le même contexte, les méthodologies *dynamiques* (notées avec «D» dans la légende du tableau 2), sont utilisées dans les activités de calculs, d'analyses, de simulations, d'essais expérimentaux et d'essais dans des conditions réelles, dans lesquelles les chargements cycliques ou combinés sont pris en considération. Généralement, dans le cas d'un produit structural, les analyses en *statique* sont effectuées à l'étape de conception détaillée, afin d'identifier les sections critiques d'une structure (produit). Ensuite, une analyse *dynamique* (en fatigue) sera nécessaire pour déterminer la durée de vie du produit en cours de développement.

Enfin, les termes « *Destructif* » et « *Non-Destructif* » ajoutés aux méthodologies de validation expérimentale et physique, fournissent aux acteurs impliqués dans le processus de développement de produits, l'information en ce qui concerne la nature des tests auxquels le produit sera soumis. Si le test est de nature *destructive* («d» dans la légende du tableau 2), le produit sera testé jusqu'à sa défaillance dans des conditions plus sévères et les résultats seront analysés en fonction de l'allure de la fracture, tandis que dans le cas d'un test *non destructif* («nd» dans la légende du tableau 2) la performance du produit sera analysée dans des conditions normales d'utilisation qui ne devraient pas engendrer sa défaillance. Les tests Euro-NCAP représentent un exemple de tests *destructifs* qui visent à caractériser le comportement des différents composants structurels d'une voiture, suite aux divers impacts qui pourraient survenir tout au long de sa vie utile. Pour exemplifier la catégorie des tests *non destructifs*, les tests expérimentaux pour vérifier le comportement d'un projecteur de voiture aux vibrations sont considérés comme faisant partie de la catégorie des méthodes de validation *non destructive*.

Dans la section 3.2 du présent document, un diagramme de flux d'activités réunissant la combinaison la plus complète de méthodologies de conception et validation de produits sera présenté et détaillé.

Cette approche de définition et formalisation des types de produits, des critères de conception et des méthodologies de conception contribuera à l'amélioration de la communication parmi les membres d'une équipe multidisciplinaire.

### 3.2.Algorithme intégré de conception

Dans cette section, plusieurs étapes de conception/validation seront formalisées et intégrées dans un diagramme de flux d'activités. La figure 15 illustre les étapes à suivre par les concepteurs dans le processus de conception, de la phase de modélisation du produit jusqu'à la phase de sa validation finale (voir la numérotation des flèches de 1 à 6). Les activités liées à l'étape d'identification des chargements peuvent être effectuées en parallèle avec les activités de conception ou même avant. Le diagramme est applicable notamment aux produits structuraux dans le domaine des produits récréatifs (châssis,

guidon, fourche, barre parechoc, etc.), pour lesquels une étude approfondie de leur durée de vie est requise.

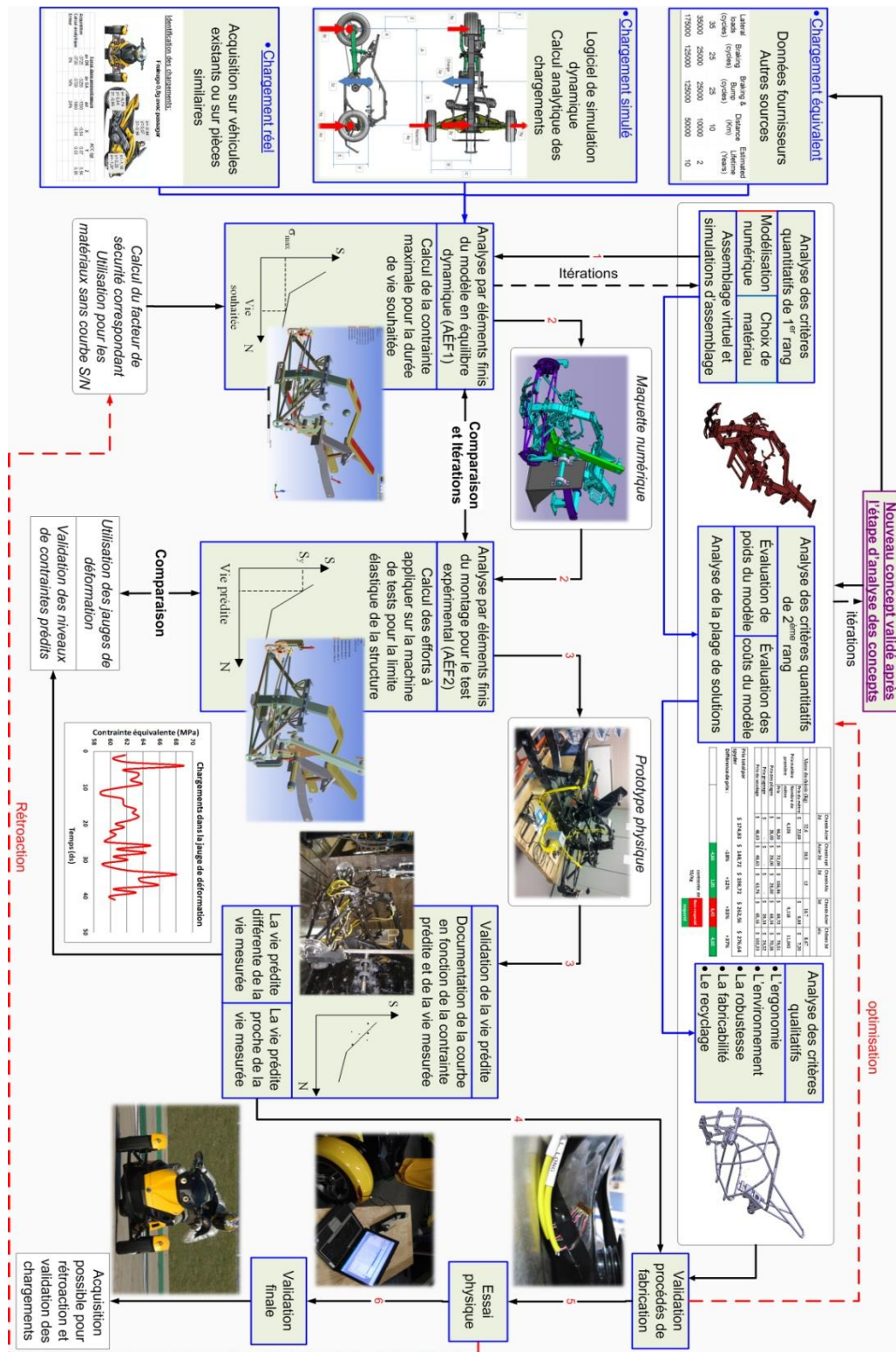


Figure 15: Diagramme de flux d'activités à l'étape de conception détaillée pour un nouveau produit

Il est déjà bien connu que pour la validation structurale d'un produit, les concepteurs ont besoin de vérifier trois éléments principaux : (1) *Chargements*, (2) *Géométrie* et (3) *Propriétés des matériaux*.

### 3.2.1. Calculs des chargements

Comme le diagramme de la figure 15 le montre, il y a des activités liées au processus de validation qui peuvent être effectuées aux étapes de conception détaillée ou même avant. Par exemple, plusieurs outils d'acquisition de données concernant les chargements peuvent être utilisés avant les étapes d'analyse des critères. On utilisera ainsi trois types de méthodes d'acquisition de données : (1) Méthode numérique (*chargement simulé*), (2) Méthode expérimentale (*chargement réel*) et (3) Méthode de « bench-marking » (*chargement équivalent*). La méthode virtuelle utilise des logiciels de simulation dynamique pour déterminer les chargements sur un produit dans certaines conditions d'utilisation (vitesse de déplacement, poids du produit, etc.).

En utilisant la méthode expérimentale, l'acquisition de données est faite avec des jauges de contraintes, appliquées sur des véhicules déjà existants, qui ont été développés soit à l'intérieur de l'organisation, soit chez les compétiteurs.

La méthode du « bench-marking » utilise les données disponibles chez les fournisseurs de diverses composantes ou d'autres sources, comme les rétroactions fournies par les concessionnaires à la suite des réparations effectuées pendant la période de garantie. Ces données pourraient aussi être obtenues en utilisant une des deux méthodes décrites dans les lignes précédentes (virtuelle et expérimentale) ou à la suite de l'analyse d'un bris survenu pendant l'usage du produit.

### 3.2.2. Analyse des critères de conception (article 2)

L'analyse des critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang représente l'étape de début de la conception détaillée du produit dont le résultat sera un prototype virtuel (maquette numérique). Les principales activités effectuées à cette étape sont la modélisation numérique de la géométrie et l'analyse de plusieurs matériaux candidats tout en respectant le cahier des charges et les facteurs de sécurité établis. Ces deux activités peuvent être effectuées

simultanément et visent à analyser la capacité du produit à résister aux chargements identifiés à l'étape précédente.

Généralement, les formes et les dimensions des pièces de machines sont déterminées d'abord par la définition d'une valeur admissible pour tout paramètre de chargement sélectionné, que ce soit la contrainte, la déflexion, la force, la vitesse, ou autre chose.

Pour déterminer la valeur admissible, le niveau critique de défaillance qui devrait être sélectionné est divisé par un facteur de sécurité (valeur toujours plus grande que 1). Le facteur de sécurité représente un critère de conception indispensable, utilisé pour tenir compte des incertitudes liées à la conception. Les dimensions sont alors calculées pour que la valeur maximale du paramètre de charge (en exploitation) soit inférieure ou égale à la valeur admissible. L'article qui suit présente deux approches différentes (déterministe et stochastique) de calcul du facteur de sécurité, qui pourraient être utilisées pour la conception d'une structure comme le châssis d'un véhicule récréatif. Cependant, l'approche stochastique qui détermine quantitativement et d'une manière analytique la fiabilité d'une structure ne peut être validée dans le cadre du projet parce que cette approche statistique nécessite plusieurs échantillons (au moins 100 pour une précision raisonnable) et le temps ne nous permet pas de faire une telle étude. Cependant, un test physique et une étude post commercialisation auprès des clients seraient utiles pour analyser le comportement de la structure dans des conditions normales d'utilisation.

## Avant-propos

### Auteurs et affiliation :

C. Iorga : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique ;

A. Desrochers : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique;

C. Smeesters : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date d'acceptation :** 18 mai 2012

**Conférence :** CEEA, 17-20 juin 2012, Winnipeg, MB

### Références :

65) [Budynas-Nisbet (2008),] ; 66) [Burdekin F. M., (2007)] ; 67) [Castillo E, Losada MA, Mínguez R, Castillo C, Baquerizo A., (2003)]; 68) [Cheol-Eung Lee, Seung-Woo Kim, Dong-Heon Park, Kyung-Duck Suh, (2011)]; 69) [Ching J., Hsieh Y., (2009)]; 70) [Clausen J., Hansson S., Nilsson F. (2006)]; 71) [Freudenthal (2010)]; 60) [Marshak K. and Juvinall R. (2012)]; 72) [Pradlwarter H. J., Schuëller G. I., Koutsourelakis P.S., Charmpis D. C., (2007)]; 73) [Staab G., Busby H. and Collins J. A. (2010)]; 74) [Vidosic, Joseph P. (1957)].

**Titre français :** LE PROCESSUS DE CONCEPTION DANS UNE PERSPECTIVE DE PREVENTION DES DÉFAILLANCES

### Contributions au document :

Cet article contribue à la thèse en intégrant deux approches qui peuvent être utilisées pour la prévention des défaillances dans le processus de développement de produits, soit *l'approche déterministe (F.S.)* et *l'approche stochastique (la fiabilité)*. Les approches développées dans cet article sont appuyées par des exemples tirés de l'industrie des produits récréatifs pour souligner leur applicabilité à cette niche industrielle. L'article souligne également la prise en compte, par les équipes de conception, de tous les aspects entourant le produit et ses applications, jusqu'à la détermination de ses facteurs de sécurité. Ces types d'approches évitent le surdimensionnement du produit, tout en lui conférant la robustesse nécessaire afin de répondre aux critères mécaniques établis à l'étape d'identification des chargements.

### Résumé français :

*Le développement de produits est un processus itératif de prise de décisions qui implique des interactions entre plusieurs paramètres de conception. L'objectif général du PDP est de fournir la combinaison optimale de géométrie, matériau et chargements.*

*Malheureusement, l'optimum absolu ne peut que rarement être atteint parce que typiquement, les paramètres et les critères de conception impliquent des synergies mais également des compromis.*

*Conséquemment, les incertitudes liées aux paramètres et aux critères de conception devront être prises en considération tout au long du PDP. À cette fin, l'intégration des méthodes déterministes et stochastiques dans le PDP sera encouragée.*

*L'approche déterministe permet aux ingénieurs de calculer un facteur de sécurité en fonction des incertitudes identifiées suite à l'analyse des chargements, des conditions d'utilisation du produit et des caractéristiques du matériau.*

*L'approche stochastique est basée sur la nature statistique des paramètres de conception et centrée sur la fiabilité du produit.*

## ENGINEERING DESIGN FROM A SAFETY PERSPECTIVE

*Cristian Iorga, Alain Desrochers, and Cécile Smeesters*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Université de  
Sherbrooke

[Cristian.Iorga@USherbrooke.ca](mailto:Cristian.Iorga@USherbrooke.ca), [Alain.Desrochers@USherbrooke.ca](mailto:Alain.Desrochers@USherbrooke.ca), and  
[Cecile.Smeesters@USherbrooke.ca](mailto:Cecile.Smeesters@USherbrooke.ca)

**Abstract** – *Engineering design is an iterative decision-making process involving interactions between three elements: geometry, materials and loads. The objective is to provide an optimum combination of these design parameters. Unfortunately, the absolute optimum can rarely be achieved because the design criteria typically place counter opposing demands and uncertainties must be accommodated.*

*To this end, the integration of both deterministic and stochastic methods into the product development process is encouraged. The deterministic method allows designers to calculate a design safety factor based on the uncertainties of a loss-of-function parameter and a maximum allowable parameter. Stochastic methods are based on the statistical nature of the design parameters and focus on the reliability of the design.*

*Links between these elements will thus be emphasized and supported with examples from the recreational product industry.*

**Keywords:** Engineering Design, Reliability, Design Safety Factor, Design Parameters.

## 1. INTRODUCTION

A key strategy in the PDP (*Product Development Process*) is to avert failure of a machine or structure by predicting and analyzing potential failure scenarios at the design stage, before the machine is built [65, 60, and 73]. By identifying the loads, the governing failure modes and tentatively selecting the appropriate candidate material, the failure prediction scenarios provide a basis for choosing the optimal combination of design parameters: geometry, material and loads. Ideally, if load cases and material characteristics were perfectly known, the geometry of machine parts could readily be determined by simply making sure that operating loads or stresses never exceed the strengths at the most critical zones of the part [60].

The topics outlined in this paper will introduce students to product related issues such as safety and reliability. The examples that follow each topic also provide students with a better understanding of the design from a failure prevention perspective.

## 2. DETERMINISTIC APPROACH TO FAILURE PREVENTION

Early in the PDP, the geometry of a part is usually determined by first defining a *design-allowable value* for whatever *loading parameter* is selected, whether it is deflection, stress, strain, load, speed, etc. [66]. For example, to determine the design-allowable force ( $P_d$ ), the *critical failure level* corresponding to the selected loading parameter ( $L_{fm}$ ) is divided by a *design safety factor* ( $n_d$ ) to account for variabilities and uncertainties identified up-stream in the design process. Thus, following the calculations the maximum operating value of the selected loading parameter can be determined and it is less than the design-allowable value [65, 66, 60, and 73]. Mathematically, this may be expressed as:

$$P_d = \frac{L_{fm}}{n_d} \quad (\text{a})$$



The selected loading parameter is often the stress and the critical failure level will be the *material strength corresponding to the governing failure mode* [65, 69, and 70]. Hence, from an engineering point of view, a more usual form of (a) is:

$$\sigma_d = \frac{S_{fm}}{n_d} \quad (b)$$

Where  $\sigma_d$  is the maximum-allowable stress,  $S_{fm}$  is the strength of the material corresponding to the governing failure mode, and  $n_d$  is the design safety factor. To provide a safe design, the engineers have to calculate the dimensions so that the maximum operating stress levels are equal to or less than the design-allowable stress ( $\sigma_d$ ) [65, 60, and 73].

The deterministic method, suggested by Jack A. Collins [73], uses a series of semi-quantitative smaller decisions that may be weighted and empirically recombined to calculate an acceptable value for the design safety factor, tailored to any given specific application [60, 73]. Even experienced designers find this approach valuable when faced with designing a new product or improving an existing one. For an appropriate selection of a design safety factor, this method considers separately each of the following eight *rating factors* [73]:

1. The precision with which the forces, deflections, or other failure-inducing factors can be determined;
2. The precision with which the stresses or other loading parameters can be determined from the forces or other failure-inducing factors;
3. The precision with which the strengths or other measures of failure can be determined for the selected material in the appropriate failure mode;
4. The need to reduce weight, space, money;
5. The seriousness of the consequences of failure in terms of human life and/or property damage;
6. The quality of manufacturing;
7. The conditions of operation (*corrosion, temperature, off-road, etc.*);
8. The quality of inspection and maintenance possible during the product life.

A semi-quantitative estimation could be made by assigning to each rating factor a *rating number*, ranging in value from -4 to +4 [73]. A Likert scale was used to provide values to these rating numbers (*RNs*) and they have the following meanings:

- $RN=0$  (*No need to modify  $n_d$* ) ;
- $RN=1$  (*Mild need to modify  $n_d$* ) ;
- $RN=2$  (*Moderate need to modify  $n_d$* ) ;
- $RN=3$  (*Strong need to modify  $n_d$* ) ;
- $RN=4$  (*Extreme need to modify  $n_d$* ).

Moreover, if the safety factor needs to be increased, the selected rating number is assigned a positive (+) sign. If the safety factor needs to be reduced, the selected rating number is assigned a negative (-) sign [65, 73].

The next step is to calculate the algebraic sum,  $t$ , of the eight rating numbers, giving :

$$t = \sum_{i=1}^8 RN_i \quad (c)$$

Using the results from (c), the design safety factor,  $n_d$ , may be empirically estimated from:

$$n_d = \begin{cases} 1 + \frac{(10+t)^2}{100} & \text{for } t \geq -6 \text{ (d)} \\ 1.15 & \text{for } t < -6 \text{ (e)} \end{cases}$$

Using this method, the design safety factor will never be less than 1.15, and will rarely be larger than 4 or 5. This range is broadly compatible with the usual list of suggested safety factors found in most design books [71, 60, and 73].

However, special caution must be taken in setting the design safety factor ( $n_d$ ) [65]:

- Avoid “chained” safety factors, i.e. applying safety factors on several elements in the same computation (ex.: doubling both the maximum load and the member section in a stress calculation, leading to a  $n_d = 2 \times 2 = 4$ );
- Avoid hidden safety factors such as those arising from the systematic rounding up of numbers in design parameter calculation sequences, to be on the conservative (safe) side;
- Consider adapting safety factors to reflect the specific risk of the various systems in a product (ex.: structural vs. aesthetic parts);

- Choose appropriate safety factors on serial mechanical components to establish a “fuse” (ex.:  $n_d(\text{key}) < n_d(\text{shaft})$ );
- Verify whether the global safety factor of any given product remains acceptable. The global safety factor will be the lowest safety factor of all subsystems (weakest link);
- Verify that there is no standard, guiding the values of the safety factor for some specific products critical to user safety (ex.: boiler or elevator).

Moreover, several considerations regarding safety factors have been identified:

- Safety factors are an engineering expression of the customer or product requirements from a resistance standpoint;
- Safety factors can be seen as an insurance against design risks;
- Safety factors can embed the expertise gained using a stochastic approach or other approaches based on experimental testing;
- Safety factors are generally kept confidential by companies;
- If disclosed, safety factors could be misused in trials, hence leading to liability in case of accident;
- Safety factors must nevertheless be internally documented for product traceability.

### Example 1

The method outlined in this section is applied to calculate the safety factor for the frame of a new recreational product. In this instance, the engineers have been asked to calculate the appropriate safety factor for a new structure.

The project may be regarded as “average” in many respects, and the material properties are very well known. Moreover, the need to conserve weight and money is strong, there is also a genuine concern about threat to life and property if the part fails, and the quality of inspection and maintenance is regarded as “satisfactory”.

In this context, the engineer’s task is to determine the appropriate safety factor for this part.

### Solution 1

Based on the given information, the rating numbers assigned to each of the eight rating factors might be chosen as follows:

1. Accuracy of applied loads = 0;
2. Accuracy of stress calculation = 1;
3. Accuracy of material stress = -1;
4. Need to conserve weight and money = -3;
5. Seriousness of failure on life and properties = +3;
6. Quality of manufacturing = 0;
7. Conditions of operation = 0;
8. Quality of inspection and maintenance = +1.

The next step is to calculate the algebraic sum ( $t$ ), of the eight rating numbers:

$$t = 0 + 1 - 1 - 3 + 3 + 0 + 0 + 1 = 1$$

Since  $t \geq -6$ , the recommended value for an appropriate design safety factor for this application would therefore be:

$$n_d = 1 + \frac{(10 + 1)^2}{100} = 2.21$$

This approach represents a rough estimation of the safety factor that would be made in the earlier steps of product design. The available statistical data concerning the eight rating factors will enable the optimization of the design. The next section will thus emphasize the need for stochastic approaches to optimize and validate the design criteria.

### 3. STOCHASTIC APPROACH TO FAILURE PREVENTION

In order to obtain quantitative estimates of the percentage of anticipated failures, we must look into the nature of the distribution curves for significant stress and strength [67, 71 and 74].

By definition, reliability ( $R$ ) is the probability that the strength exceeds the stress, or:

$$R = P\{S_{fm} > \sigma_d\} = P\{S_{fm} - \sigma_d > 0\} \quad (f)$$

The normal distribution is the probability density function most commonly used by designers for the calculation of product reliability [67, 72 and 73]. The probability density function  $f(x)$  for the normal distribution can be expressed as follows:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{for } -\infty < x < \infty \quad (g)$$

where  $x$  is a random variable such as stress or strength,  $\hat{\mu}$  is the estimated *sample mean*, and  $\hat{\sigma}$  is the estimated *sample standard deviation*, where:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{h})$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{\mu})^2} \quad (\text{i})$$

In these expressions,  $N$  equals the number of items in the sample. As a matter of interest, the square of the standard deviation  $\hat{\sigma}^2$  is defined as the *variance*. Both variance and standard deviation are measures of dispersion, or scatter, of a distribution [65]. The conventional notation for describing a normal distribution is:

$$x \stackrel{\text{d}}{\Rightarrow} N(\hat{\mu}, \hat{\sigma}) \quad (\text{j})$$

which is to be read as “ $x$  is distributed normally with mean  $\hat{\mu}$  and standard deviation  $\hat{\sigma}$ ” [73].

The corresponding normal cumulative distribution function,  $F(X)$ , can be expressed as follows:

$$F(X) = P\{X \leq X_0\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_0} e^{-t^2/2} dt \quad (\text{k})$$

$$X = \frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (\text{l})$$

where  $X$  represents the standard normal variable, normally distributed with a mean of 0 and a standard deviation of 1.  $X_0$  is any specified value of the random variable  $X$  [65, 68, 60, 73 and 74]. Thus, the *normal distributions* with mean  $\hat{\mu}$  and standard deviation  $\hat{\sigma}$  can be transformed into a *standard normal distribution* using equation (l) [67].

The normal distributions can be defined by  $\hat{\mu}$  and  $\hat{\sigma}$ . Hence, they are also called *two-parameter distributions*. When several normally distributed random variables are summed, the result is also normally distributed with a mean equal to the sum of each distribution means and a standard deviation equal to the square root of the sum of each variance [73]. Therefore, when  $f(\sigma_d) = f(\sigma)$  and  $f(S_{fm}) = f(S)$  are both normal

probability density functions, the random variable  $y = (S_{fm} - \sigma_d) = (S - \sigma)$  used in equation (f) is also normally distributed with a mean and standard deviation of:

$$\hat{\mu}_y = \hat{\mu}_S - \hat{\mu}_\sigma \quad (\text{m})$$

$$\hat{\sigma}_y = \sqrt{\hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_\sigma^2} \quad (\text{n})$$

Finally, the reliability  $R$  may be expressed as:

$$R = P\{S_{fm} - \sigma_d > 0\}$$

$$= P\{y > 0\}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\hat{\mu}_y}{\hat{\sigma}_y}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\hat{\mu}_S - \hat{\mu}_\sigma}{\sqrt{\hat{\sigma}_S^2 - \hat{\sigma}_\sigma^2}}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (\text{o})$$

$$Y = \frac{y - \hat{\mu}_y}{\hat{\sigma}_y} \quad (\text{p})$$

where  $Y$  is the standard normal variable.

## Example 2

It is assumed that for the structural application presented in example 1 a tubular section of  $D = 26\text{mm}$  (outside diameter) and  $d = 20\text{mm}$  (inside diameter) made of 2024-T4 aluminum had been chosen.

Experimental data for the material tested under conditions that closely match those of the actual operating conditions indicate that the fatigue strength is normally distributed with a mean value of 220MPa and a standard deviation of 30MPa. The cyclic load on the tube has a nominal value of 22kN, but this load has been found to actually be a normally distributed random variable with a standard deviation of 1kN.

The reliability goal for this part was established as  $R = 99.5\%$ .

With these data, the engineers have to: a) verify the safety factor established up-stream for this design process; b) find the actual reliability of the tube and optimize its geometry until the reliability goal is met.

## Solution 2

a) First, the nominal design stress is:

$$\begin{aligned}\sigma_d &= \frac{P}{A} \\ &= P / (\pi/4 (D^2 - d^2)) \\ &= \frac{4(22\text{kN})}{\pi((26\text{mm})^2 - (20\text{mm})^2)}\end{aligned}$$

$$= 101.5\text{MPa}$$

Based on fatigue criteria, the safety factor is thus:

$$n_d = \frac{S_{fm}}{\sigma_d} = \frac{220\text{MPa}}{101.5\text{MPa}} = 2.17 \cong 2.21$$

Hence, the initial safety factor is verified.

b) From the data provided  $P \stackrel{d}{\Rightarrow} N(22\text{kN}, 1\text{kN})$ ,  $S_{fm} \stackrel{d}{\Rightarrow} N(220\text{MPa}, 30\text{MPa})$ , the calculated mean stress is  $\hat{\mu}_\sigma = 101.5\text{MPa}$  and the estimated standard deviation is:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_\sigma &= \frac{\hat{\sigma}_P}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} \\ &= \frac{4(1\text{kN})}{\pi((26\text{mm})^2 - (20\text{mm})^2)} = 4.6\text{MPa}\end{aligned}$$

Hence

$$\sigma_d \stackrel{d}{\Rightarrow} N(101.5\text{MPa}, 4.6\text{MPa})$$

The lower limit of the reliability integral in (o) may thus be calculated as:

$$Y_0 = -\frac{\hat{\mu}_s - \hat{\mu}_\sigma}{\sqrt{\hat{\sigma}_s^2 - \hat{\sigma}_\sigma^2}} = -\frac{220\text{MPa} - 101.5\text{MPa}}{\sqrt{30\text{MPa}^2 - 4.6\text{MPa}^2}} = -4.00$$

From tables of the cumulative distribution function for the standard normal distribution, the reliability corresponding to  $Y = -4$  may be read as:

$$R(-y) = 1 - R(y) = 1 - P\{y > 0\} = 0.99997$$

It has to be emphasized here that no strength-influencing factors such as surface finish, corrosion, and so forth, have been considered in this example. A more accurate prediction could be made by considering such factors.

Table 3 presents the results of several iterations that have been made to achieve the initial objective for the application: A reliability of 99.5%.

**Tableau 3: Dimensional optimisation of tubing size**

| Iteration | Geometry         | $n_d$       | $Y$          | $R$          |
|-----------|------------------|-------------|--------------|--------------|
| 0         | D26-d20          | 2.17        | -4.00        | 99.9%        |
| 1         | D25-d20          | 1.77        | -3.24        | 99.9%        |
| 2         | D24-d18          | 1.98        | -3.68        | 99.9%        |
| 3         | D22-d16          | 1.79        | -3.30        | 99.9%        |
| 4         | D23-d18          | 1.61        | -2.84        | 99.8%        |
| 5         | D22-d18          | 1.26        | -1.55        | 94.0%        |
| 6         | D23-d18.5        | 1.46        | -2.40        | 99.2%        |
| 7         | <b>D23-d18.3</b> | <b>1.52</b> | <b>-2.59</b> | <b>99.5%</b> |

Owing to the use of available statistical data, the stochastic approach provides more precision in making design decisions about materials and dimensions, and at the same time, preserves the designer's ability to account for design uncertainties and variability. In this example, it could be seen that the reliability of the part was initially too high



compared to reliability goal of the project. Consequently the approach entailed backward iterations to search for other, more appropriate, combinations of geometry and loads.

#### 4. OPTIMIZATION OF THE SAFETY FACTOR AS A RESULT OF HIGHER RELIABILITY DATA

Rather than choosing between the two approaches, a more productive viewpoint might be to combine the best attributes of each for making clever design decisions. Thus, where well-defined probabilistic data are available for describing strength, loading and manufacturing practices, this quantitative statistical information might be integrated piecewise in the design safety factor approach. As more precise probabilistic data are incorporated, the rating numbers (*RNs*) tend to be driven toward more negative values, since more precise information would result in a drive to lower the design safety factor.

Errors in the deterministic approach (safety factors) can be detected by the stochastic approach (reliability) and vice-versa.

The integration and the application of both deterministic and stochastic approaches into undergraduate projects represent an original method from an educational stand point. Integrating these approaches into the product development process represents an original way to provide the students with more precise data, helping them make more sensible decisions concerning design parameters (materials, geometry and loads) while preserving the student's aptitude to take into account the uncertainties that are not supported by statistical data.

The proposed approaches also allow the students to perform design iterations throughout the steps of the product development process and to optimize their initial concept depending on the new data collected during this process. This method also has a significant influence on the robustness of the final product by preventing both over-design and poor-design, hence increasing the design team's competencies and helping the students to look back at the product requirements and client needs with the aim of providing the optimum solution for each design problem encountered.

## 5. CONCLUSIONS

The article presents two methods of failure prevention by calculating a reasonable design safety factor and by estimating an appropriate reliability goal for a structural part. The product optimization was also integrated into the design process, by performing stochastic analyzes and finally choosing the optimal combination of design parameters with the correspondingly appropriate safety factor for this part.

Using the statistically significant new strength data in example 2 results in a design safety factor reduction of about 30% (*from the initial safety factor of 2.17 to the optimized safety factor of 1.52*). It should however be cautioned that the 30% reduction in design safety factor does not necessarily correspond to a matching 30% increase in calculated design-allowable stress. The reason for this is that the limit value of the governing failure mode used in the calculation of the design-allowable stress depends upon the choice of an appropriate reliability objective for the structure.

Although most real design situations involve fluctuating loads that produce multi-axial states of cyclic stress, no consensus has yet been established on the best approach for the prediction of failure under such conditions of stress. However, the approach adopted by researchers involves the concept of an equivalent stress to define a uni-axial equivalent to the real multi-axial state of cyclic stresses, including both the alternating stress amplitudes and mean stresses. More information and details concerning this approach is provided in the references [65, 60, and 73].

The following conclusions can be made based on the proposed methods outlined in this paper:

1. Selection of a safety factor must be undertaken with care to avoid the negative consequences associated with the selected values (*safety factor too small = high probability of failure; safety factor too large = cost, weight or size too high*);
2. Assessing a realistic reliability goal requires a good knowledge of the limitations in the simulation programs used, the mechanical properties of the material chosen and the operational details of the product (load cases);
3. Both, the deterministic and stochastic methods to prevent failure have a very significant influence on the optimization of several design criteria (ex.: cost, weight and manufacturing processes);

4. The approaches outlined in this paper will be applied to undergraduate projects and integrated in the mechanical engineering curricula at the Université de Sherbrooke.
5. The deterministic approach will allow students to estimate a reasonable safety factor while the stochastic approach will provide a more realistic goal for their design.

If we were to make a review of the fundamental steps of the product development process detailed by Iorga and Desrochers [annexe E], the deterministic method would be performed at the design criteria analysis phase (more specifically, 1<sup>st</sup> rank quantitative criteria). Conversely, the stochastic method would be performed either at the loads identification step (preliminary design) or after the laboratory and physical tests (detailed design), depending on the availability of pertinent data.

The approaches outlined in this paper will help students involved in undergraduate projects to make sound engineering decisions regarding the safety and reliability of their product and to understand the place of these approaches in the product development process.

*(Fin de l'article)*

## Post-propos

Les exemples détaillés dans l'article présenté dans cette section mettent en évidence la possibilité d'optimiser le facteur de sécurité d'une structure jusqu'à 30%. Cependant il faut garder à l'esprit le fait que cette activité d'optimisation devrait être basée sur des données expérimentales et/ou sur des spécifications du matériau qui peuvent améliorer la pondération des huit facteurs pris en compte.

= Continuation de la section 3.2.2 Analyse des critères de conception =

Plusieurs itérations sont possibles à cette étape d'analyse des critères, en utilisant par exemple un logiciel d'analyse par éléments finis, afin de modéliser la géométrie du produit dans le respect des critères de conception de 1<sup>er</sup> rang (la rigidité, la limite d'endurance, la limite ultime, etc.). Cette étape doit être complétée avant d'entamer l'analyse des critères quantitatifs de 2<sup>ème</sup> rang parce qu'une analyse de coûts ou de poids d'un produit ne sera pas possible sans avoir établi au préalable quelques solutions combinant les deux variables de conception : la géométrie et le matériau.

Dans la deuxième étape de ce bloc d'analyse de critères, les concepteurs s'intéressent à la capacité du produit de respecter d'autres critères quantitatifs associés à la compétitivité du produit sur le marché par exemple son coût et son poids. Ces critères sont en étroite liaison et dépendent de la géométrie et du choix de matériau. Plusieurs retours aux étapes précédentes sont bien sûr possibles et même souhaitables afin de trouver plusieurs combinaisons possibles (géométrie/matériau) qui satisfont les critères quantitatifs (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> rang). L'analyse des coûts en particulier doit couvrir toutes les activités du PDP ayant impliqué des dépenses (conception/validation, fabrication, maintenance, recyclage, transport, entreposage, etc.) afin de déterminer la rentabilité du projet. Ainsi, un résultat non probant pour une telle analyse pourrait engendrer l'arrêt du projet ou la recherche d'alternatives (déménagement d'une chaîne de production, sous-traitance des tâches aux tiers, etc.).

Afin de vérifier si un produit respecte certains critères non quantifiables, une analyse de ces critères est imposée dans le processus de conception à la phase de conception détaillée. L'ergonomie, l'esthétique ou la fabrication font partie de cette catégorie de critères, leur analyse fournissant un retour sur les besoins du client et la perception du produit. En fonction de la voix du client, plusieurs itérations pourront être initiées au niveau de la géométrie ou des matériaux du produit, toujours dans le respect des critères quantitatifs analysés aux étapes précédentes.

### 3.2.3. Validation des produits (article 3)

L'article intégré dans cette section présente une méthodologie détaillée de conception et validation applicable au développement de nouveaux produits. Plusieurs aspects liés aux étapes d'évaluation et de validation du produit sont exposés dans cet article dans le but de les intégrer dans le PDP. Par exemple, la méthodologie proposée dans cet article représente une « check-list » qui facilitera la gestion des ressources humaines, matérielles et financières dans le cadre du PDP jusqu'à la phase de la validation finale du produit.

Les approches développées dans l'article qui suit, répondent également aux besoins identifiés à la section 1.1.

## Avant-propos

### Auteurs et affiliation :

C. Iorga : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique ;

A. Desrochers : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date d'acceptation :** 16 mai 2011

**Conférence :** CEEA, 7-9 juin 2011, St. John, TN

### Référence :

7) [Jones C. and Ertas A. (1993)]; 2) [Otto K. and Wood K. (2001)]; 75) [Ertas A. et al. (1989)]; 76) [Hwang C., Tsai C., Chang C., (2004)]; 38) [Maropoulos P.G., Ceglarek D. (2010)]; 77) [Richard C. Rice, (1997)]; 78) [Debbabi M., Hassaine F. and Soeanu A. (2010)].

**Titre français :** MODÉLISATION, ÉVALUATION ET VALIDATION DE PRODUITS À LA PHASE DE CONCEPTION DÉTAILLÉE

### Contributions au document :

Cet article contribue à la thèse en élaborant une méthodologie détaillée de conception et validation applicable au développement de nouveaux produits.

### Résumé français :

*L'expansion des marchés, soutenue par l'amélioration continue des produits et la diminution du temps de mise en marché de ces derniers a conduit à de nouveaux enjeux de concurrence entre les entreprises qui développent des produits. Pour réussir dans la mondialisation des marchés et pour faciliter l'évaluation et la validation des produits, les entreprises doivent développer des méthodologies centrées sur l'analyse du cycle de vie et sur la réduction des variations du produit en service, afin d'obtenir à la fois la qualité et la robustesse attendues.*

*Cet article propose une nouvelle méthodologie de conception de produits qui unifie les résultats théoriques de l'étape de modélisation et les résultats empiriques obtenus à*

*partir de l'étape de validation. Les activités d'évaluation et de validation de la conception sont très importantes et elles ont une grande influence sur les performances des produits et leur fonctionnalité, ainsi que sur les perceptions des clients. Étant donné que la plupart des entreprises maintiennent la confidentialité de leurs processus de développement de produits et que la littérature existante ne fournit pas d'exemples détaillés à ce chapitre, la méthodologie proposée constituera un soutien technique et logistique destiné aux étudiants ou aux ingénieurs impliqués dans des projets académiques ou industriels.*

*Une méthodologie générique sera affinée sur la base d'une nouvelle approche qui tient compte du type de spécification (quantitative/qualitative), des objectifs de conception (nouveau/amélioré) et des types de produits (structurel/esthétique). À la fin du présent document, les améliorations apportées au PDP par la méthodologie proposée seront soulignées dans le cadre des projets d'ingénierie à l'Université de Sherbrooke.*

## **Product Modeling, Evaluation and Validation at the Detailed Design Stage**

Cristian Iorga, eng. jr., M.Sc.  
Student

[Cristian.Iorga@USherbrooke.ca](mailto:Cristian.Iorga@USherbrooke.ca)

Alain Desrochers, P.eng., Ph. D.  
Professor

[Alain.Desrochers@USherbrooke.ca](mailto:Alain.Desrochers@USherbrooke.ca)

Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, Université de Sherbrooke

### ***Abstract:***

*The expansion of the markets corroborated with product customization and short time to launch the product have led to new levels of competition among product development companies. To be successful in the globalization of the markets and to enable the evaluation and validation of products, companies have to develop methodologies focused on lifecycle analysis and reduction of product variation to obtain both quality and robustness of products.*

*This paper proposes a new design product methodology that unifies theoretical results of modeling stage and empirical findings obtained from the validation stage. The evaluations and validations of engineering design are very important and they have a high influence on product performances and their functionality, as well as on customer perceptions.*

*Given that most companies maintain the confidentiality of their product development processes and that the existing literature does not provide more detailed aspects of this field, the proposed methodology will represent a technical and logistical support intended for students or engineers involved in academic as well as industrial projects.*

*A generic methodology will be refined based on a new approach that will take into consideration the specification types (quantitative or qualitative), the design objectives and the product types: new/improved, structural/esthetic. Hence the new generic methodology will be composed of specific product validation algorithms taking into account the above considerations. At the end of this paper, the improvements provided by the proposed methodology into the design process will be shown in the context of the engineering student capstone projects at the Université de Sherbrooke.*

*Keywords: Modeling, Evaluation, Validation, Design Process*

## **1. Introduction:**

The overall objective in modern product development for maximizing immediate profit can cause conflicts between business goals and engineering practices [7]. Therefore, many aspects such as ergonomics, environmental concerns, or thorough evaluation and validation are often ignored [7]. Consequently, industry demands new and adaptable methods and techniques to preserve its long-term development as well as to ensure its innovation ability to improve the product development process (PDP) [7, 2]. This paper presents the concept of integrated product modeling, product evaluation and validation into the product development process by analyzing and reviewing the literature in the field on : (a) product modeling, (b) numerical measurement evaluation and

validation, (c) virtual methods for functional evaluation (d) cost evaluation and validation, (e) physical product evaluation and validation.

The main objective is to integrate evaluation and validation as early as possible in the detailed design process, by developing new testing methods. However, the model complexity makes the realization of this integration of evaluation and validation as part of the design stages, very difficult [75, 76].

Figure 16 illustrates the steps to be followed by the designers after the validation of the preliminary stages in the product design process. In the present industrial environment, specific methodologies are essential to deploy standardized manufacturing execution protocols in order to ensure consistent product performance in the service phase [7, 38].

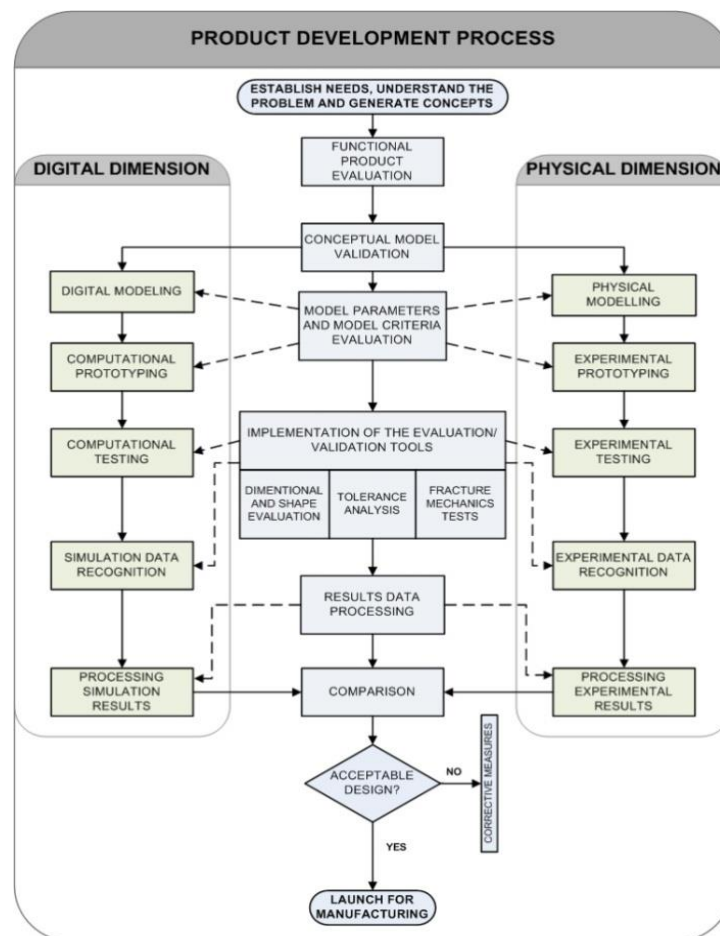


Figure 16: Evaluation and Validation steps at the detailed design phase (adapted after [38])

## 2. Product modeling:



One of the principal tasks in which engineers are involved is to build a model [7]. The process of model building is a way to present know-how and to provide a geometric shape representing the best solution. Model analysis has proved helpful in product design process, particularly when experimental testing of physical prototypes is either impossible or prohibitively expensive [7, 2]. On the other hand, in experimental design the benefits of model testing are proven in several situations [75, 76]:

- When the hypothesis of the problem is too complex for an analytical resolution, an empirical approach is deployed;
- When analytical solutions can be justified only by correlating the predicted model behavior with the behavior of the prototype;
- When the characteristics of the models can't be studied, such as those with: large structures, molecular structures or an environment that cannot be simulated.

### **3. Product Evaluation and Validation (E&V):**

Existing validation methodologies are rarely supported by formal foundations and an efficient E&V approach should comply with the following guidelines [77, 78]:

- Enable automation as much as possible
- Encompass formal and rigorous reasoning in order to minimize human errors
- Include the graphical representation provided by CAD/CAM tools.

#### **3.1 Virtual methods for functional product evaluation:**

The finite element approach gives a piecewise approximation to the governing equations of a structure. The principle of the finite element method is that the domain can be analytically modeled or approximated by replacing it with an assemblage of discrete elements [7]. Because these elements can be put together in several ways, they can be utilized to model very complex shapes.

The company's interest in reducing the utilization of physical tests and cutting the cost and time of product evaluation and validation has pushed the researchers toward the development of Virtual Testing Labs (VTL) where the Finite Element Analysis (FEA) technique is employed to simulate the possible behavior of real world structures before their actual failures [7, 2, and 75]. However, to replace physical testing by virtual simulations, procedures must be put in place to verify that the virtual tests are able to replicate the physical tests and to generate the necessary confidence needed by designers

[38]. The first step of the FEA is the idealization phase which takes the structural design problem and turns it into an idealized mathematical model, the Finite Element Model (FEM) [7, 38]. In the second step of the FEA the engineers have to select the appropriate finite elements: mesh layouts and solution algorithms to define the structural behavior of the idealized mechanical system [7, 38].

Even if classical computational stress analyses could provide good prediction in the elastic domain, they have not achieved yet an accurate solution in the presence of damage and fracture [38].

### 3.2 Product cost evaluation and validation:

The capacity to estimate costs accurately is essential if a company is to stay in business. Unfortunately, cost analysis is just an estimation process and in the best of circumstances will only provide a good approximation of the cost that will actually be engaged [7]. The cost targets of the new product should be established in the early stages of a design process [7, 2]. Thus, the system performance requirements are constantly re-evaluated to identify areas of potential cost reduction. The cost breakdown structure is another technique of managing cost in a major program [7]. The cost breakdown structure adapted by Jones and Ertas ties the activities of the product lifecycle to the available resources by subdividing the total cost into logical categories such as the functional areas and major tasks to be accomplish as shown in Figure 17 [7].

The definitions used in the cost breakdown structure are adapted to the manner in which cost analysis is administrated [7].

Neglecting the time value of money, the life-cycle cost of an asset can be determined by using the equation [7]:

$$ALCC = \frac{P}{n} + O + \frac{(n-1)M}{2}$$

...where,

ALCC=average annual life-cycle cost

O=constant annual operating cost (equal to first year operating cost including a portion of maintenance)

M=annual increase in maintenance costs

n=life of the asset in years

$P$ =initial cost of asset

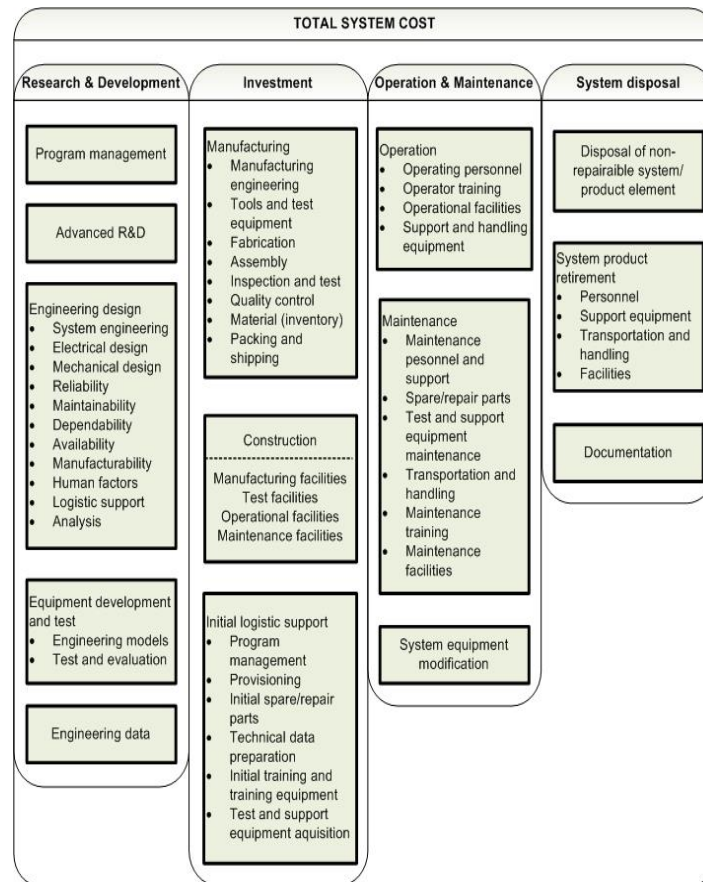


Figure 17: Generic cost breakdown structure [7]

### 3.3 Physical product evaluation and validation:

Before virtual modeling and verification became imperative conditions of rapid product development, physical prototyping techniques were dominant in industry and have influenced product performance, quality and competitiveness in the global markets [38]. In industry practice, physical testing is still frequently linked to product certification. For example, automobile manufacturers are required to test their prototypes following combustion and safety standards [77]. However, physical tests provide an important quantity of knowledge and data that can be utilized to improve the design of future products or design alternatives [38, 77].

The overall product test is pretty much defined by the V-Chart in Figure 18. The chart contains information on the types of tests to be performed and, if we consider the X-axis as time, we can have a rough picture of the order in which the events take place.

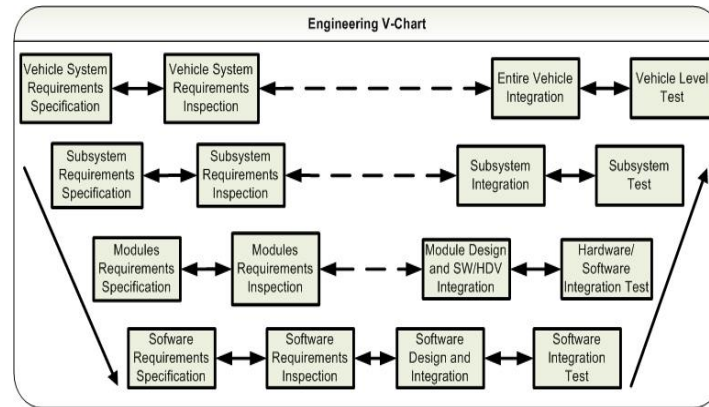


Figure 18: Engineering V-Chart [7]

A test process is complete only when training is in place to support its survival. The training has to contain the following components [77]:

- The philosophical background of the test strategy (*WHY?*)
- The explanation of the test methods to be applied at the different integration levels (*HOW?*)
- The guidelines for applying the different test methods (*WHEN?*)
- A good definition of the job functions of all those involved in tests (*WHO?*)

Hence, the following steps have to be made by the students in product durability validation to organize a service history simulation test program: 1) Test objective, 2) Test specimen, 3) Environmental input exciters, 4) Data recording Location, 5) Data analysis, 6) Test system programming and control, 7) Durability test monitoring and analysis. Each of those steps is described in detail in the reference by Rice [77]. The challenge for the designers is to integrate these steps as much upstream as possible into the design process in order to minimize the time and costs of the PDP.

#### 4. A new integrated design methodology at the detailed design stage:

In this section, an integration of evaluation and validation stages at the detailed design phase of the product design process will be proposed.

The goal of this chapter is to provide a good understanding and an accurate global view of the validation activities as an integrated part of the product design process.

A generic framework will be developed in this section as a synthesis of the activities that should be made by the engineers regarding the design and validation criteria analysis.

Several mechanical criteria will be defined as *primary quantitative criteria* taking into account their importance in terms of design for security.

Analysis of the primary quantitative criteria will generate the calculation of a safety factor for each proposed criteria. Other quantifiable criteria such as cost and weight will be considered as *secondary quantitative criteria*. They are also very important but they represent the criterions that have no importance regarding the security of the product users. Moreover, *qualitative criteria* represent the third category of design criteria that will be taken into consideration by designers or students. These qualitative criteria will be prioritized in order to develop the matrix of relational analysis between qualitative criteria and the functional solutions according to the design variables (Figure 19).

| Criteria weighting | Qualitative criteria     | Roadster's chassis (DATUM) AMS7913C/geometry1 |   | Roadster's chassis AMS4209C/geometry2 |   |       | Decision   |
|--------------------|--------------------------|---|---|---------------------------------------|---|-------|--|
|                    |                          | Weighting of model 1                          | Comment   | Weighting of model 2                  | Comment   | Score |  |
| 3                  | Design for assembly      | 2   | Reduced number of fasteners (35) and easy to assemble (1h15') | 3                                     | Reduced number of fasteners (32) and very easy to assemble (1h)             | +1    | The chosen model will be the one with geometry2 because it achieves two of three qualitative criteria. Even if the material AMS4209 is less recyclable than AMS7913, the first one will be kept because of its low price and compliance with environmental standards |
| 2                  | Design for manufacturing | 1   | Requires weld beads in locations with limited access          | 2                                     | The structure requires less mounting positions during the machining process | +1    |  |
| 2                  | Design for environment   | 2   | Recyclable material at 95%                                    | 1                                     | Recyclable material at 85%  | -1    |  |

**Figure 19: Example of decision making matrix in terms of qualitative design criteria**

All design criteria defined above can also be expressed in two dimensions, depending on clients needs and absolute or relative constraints. For example a client can express a desire concerning the weight of a product component. This requirement can be absolute, when the constraint is a value that must be respected (ex.: max. 50 kg.) or relative, when the constraint is expressed as a need level of the client (ex.: the lightest in the market).

Based on the approaches presented in the 2nd section and those developed in the 3rd section of this paper, a more detailed framework is proposed. The design framework

developed in Figure 20 represents an improved synthesis of all stages of the design process at the detailed design phase including the product validation stage.

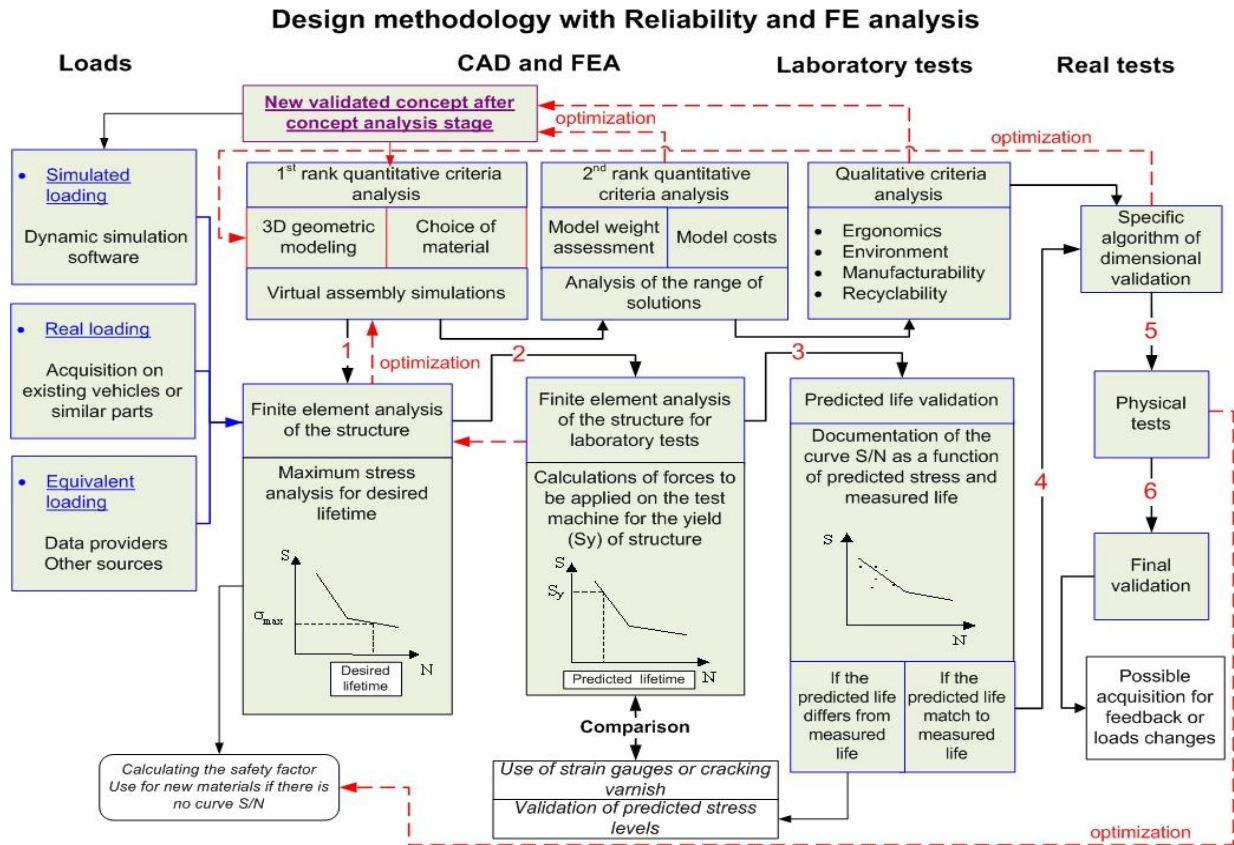
Depending on the product type, the proposed design framework can either be carried out in sequential or parallel format. Not all activities can be carried out in parallel due to resource constraints, product type or logical sequence of the activities.

The structured approach of concurrent engineering tools as Economic Analysis (EA), Finite Element Analysis (FEA), or Design for Assembly/Manufacturing (DFA/DFM) can ensure that future problems in manufacturing and operations can be avoided. The proposed methodology will act as a roadmap for project planning as it specifies the tools and techniques to be applied at each phase of the product design process. The methodology should also serve as a checklist to avoid omission of critical activities. The evaluation mechanism is similar to that of the stage-gate approach where all the activities are reviewed and important decisions are to be made after each review. The physical tests will then ensure that customer needs and initial design objectives are fully met. Relevant combinations of design and validation situations will be considered by engineers or students to solve problems of mechanical stress, geometry, and lifecycle. Both theoretical and experimental analysis will be imposed for each performance criterion chosen.

The algorithms developed at the Department of Mechanical Engineering of the Université de Sherbrooke are generic methodologies which involve both the virtual and physical dimensions of the design process. These methodologies were improved by integrating a criteria analysis algorithm and specific validation algorithms at the modeling stage of the product design process. The methodology shown in Figure 20 presents a generic flow of all activities linked to the mechanical analysis and validation activities of new product situations. This type of design (new design) involves the application of one or several original solutions to an arbitrary function of the product.

It is however obvious for both new product and optimized design situations that the validation stages are mandatory. This aspect of product validation is imperative for both new and optimized designs because the physical tests have to be made accurately regardless of the design case and with respect to the client requirements.





**Figure 20: Integration of evaluation/validation stage in the NDP**

To properly validate the best numerical design, the results of the mechanical analysis and cost analysis must be compared to the performance criteria and the mechanical parameters established during the first stage of the methodology.

Moreover, the methodology allows a comparison of results that will lead to an optimization of the geometry based on the properties of some selected materials. If the results are satisfactory after the physical tests, the product will go on to the next level of its lifecycle: manufacturing launching or process validation. If the product is not acceptable after the laboratory tests, then it becomes necessary to change its geometry and to compute the performance criteria again. The optimization loops shown in figure 20 will allow designers to improve their initial design by using the feedback provided by each design analysis.

The Finite element analysis of the structure for laboratory tests represents a gate between the modeling stage and the laboratory validation of the product. This activity consists in the modeling and simulation of the testing machine in order to avoid unnecessary repeated laboratory tests. By calculating the forces to be applied by the test machine, designers will be able to predict more accurately the product reliability before the laboratory tests are

performed. Therefore, the students could use this approach to reduce the optimization loops at the laboratory tests stage and to improve correlation between numerical simulation and physical tests.

Thus, the designers will be able to understand the iterative overlapping in the design process and to initiate design changes between the stages early, before the downstream phase begins.

Hence, the design methodology described above has been formulated to help coordinate the development phases for concurrent execution.

Such an approach helps the multidisciplinary teams decide when to begin each downstream phase while reducing the iteration loops at the laboratory tests stage. Moreover, the design and validation methodology which is proposed will serve as a checklist to avoid omission of certain critical activities. Simplicity is another attribute of the framework proposed which will encourage participation and will prevent resistance amongst design team members. The generic design methodology provided in Figure 20 illustrates the integration of validation activities upstream in product design. Up to this point, the new approach has been expressed in this paper as a set of inter-relationships between product design and validation. The design activities flow paths have to be used in a highly interactive and iterative manner.

## **5. Conclusions :**

The generic method of mechanical design, analysis and validation described above, could serve as a guideline for students in their decisions during the development process of their projects. Taking into account the aspects of validation activities, the students will be able to provide not only a functional design but also a reliable design in terms of lifecycle validation, with respect to project deadlines and budgets.

Sections 1, 2 and 3 review product modeling techniques (mathematical, analytical or numerical) and product validation approaches (assembly and functional simulation, cost validation, physical and experimental validation), individually. The iterative fashion of the algorithm and the integration of both design and validation phases allow the students to reduce the time allocated to the detailed design process and to increase the accuracy of the product validation. The paper describes pertinent approaches in product development process and serves four functions:

- (1) To define what steps can be taken to achieve the initial goals of the product design;



- (2) To offer suggestions regarding other related things which should be examined and that may give additional insight into the design processes (design and validation criteria);
- (3) To suggest logical steps to take to ensure that additional resources and activities don't have to be allocated before sending the product to the manufacturing stage of the PDP
- (4) To provide students the logical and technical support needed for an improved management of the validation activities upstream, at the detailed design phase.

*(Fin de l'article)*

## Post-propos

En plus de permettre la bonne gestion des ressources humaines, matérielles et financières tout au long du PDP, le flux d'activités détaillé dans l'article précédent, présente également la validation de produits comme une étape intégrée dans ce processus, qui permet la rétroaction sur les étapes initiales d'un projet (besoins du client et/ou spécifications du produit).

= Continuation de la section 3.2.3 Validation des produits =

Au niveau de la validation de produits, dans une première étape, une analyse par éléments finis (AEF 1) est conduite en utilisant les valeurs identifiées à l'étape des calculs de chargements et les données concernant les propriétés du matériau choisi, afin de déterminer la limite maximale de l'effort dans les sections critiques, pour une durée de vie souhaitée (voir la boîte « Modèle éléments finis de la structure »). Un facteur de sécurité sera toujours requis dans le cas de matériaux pour lesquels aucune courbe S/N n'est disponible pour déterminer la durée de vie d'un produit.

Après avoir déterminé la contrainte maximale qui assure la durée de vie souhaitée du produit, une deuxième analyse par éléments finis (AEF 2) s'avère nécessaire afin d'identifier la meilleure fixation du produit sur la machine de tests et les forces à appliquer par le vérin sur la structure. À la suite de la simulation par éléments finis du comportement du produit sur la machine de tests, les chargements appliqués par celle-ci sont ajustés pour produire les mêmes contraintes dans les sections critiques que les chargements réels qui ont été simulés à l'étape précédente (AEF 1). Après le calcul des chargements à appliquer par la machine de tests, les ingénieurs ont la possibilité d'identifier les chargements correspondants à une durée de vie

prédite pour un test accéléré (voir la boîte « Modèle éléments finis de la structure pour les essais en laboratoires »).

Les deux étapes de simulation par éléments finis représentent la validation préliminaire du produit (dimension virtuelle) et elles seront suivies par des essais expérimentaux et en service (dimension physique), afin de vérifier la correspondance entre les calculs théoriques de la durée de vie du produit et les résultats obtenus à la suite des tests physiques. Les essais effectués en laboratoire impliquent l'application des charges cycliques calculées à l'étape (AEF 2), par la machine de tests et servent à valider la durée de vie prédite. Les résultats des tests en service servent quant à eux à la vérification et à la validation de la courbe S/N du matériau choisi.

Étant donné que dans un marché de plus en plus concurrentiel où le temps et les coûts de développement ont un impact direct sur le succès du produit, on ne se permet pas de tester plusieurs prototypes pour valider la fiabilité de ces derniers. Dans un tel cas, il y a deux risques majeurs : soit qu'on réalise des produits qui ne répondent pas aux besoins du client, soit qu'on réalise des produits surdimensionnés.

Pour éviter une situation pareille, nous avons proposé une méthodologie de validation qui tient compte de l'objectif de fiabilité établi au début d'un projet. La figure 21 montre très bien les étapes à suivre pour valider la fiabilité d'une pièce structurale dans un temps raisonnable et avec un minimum de dépenses. Les premiers six étapes illustrées dans la figure 21 représentent d'une manière plus compacte, les étapes illustrées dans la méthodologie détaillée à la figure 15. À partir des résultats du test expérimental sur un prototype complexe et en poursuivant les derniers quatre étapes illustrées dans la figure 21, il sera possible de déterminer la fiabilité du prototype, en étudiant seulement la zone critique de ce dernier.

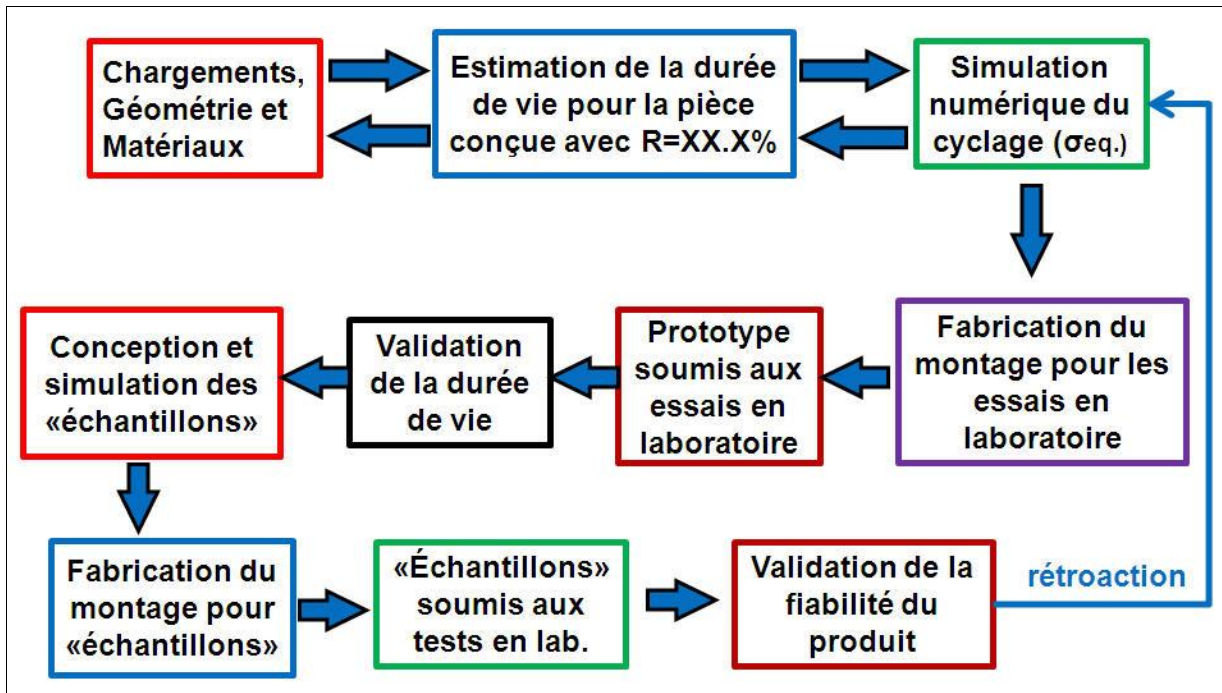


Figure 21: Méthodologie générale de conception et validation de la fiabilité des pièces structurales

La méthodologie illustrée dans la figure 21 a été développée pour valider la fiabilité d'une composante structurale d'un véhicule récréatif. Cette méthodologie permet une estimation assez précise de la fiabilité du joint le plus critique d'une structure sans qu'il ne soit nécessaire de construire plusieurs prototypes au complet. Cela sera possible en appliquant l'approche de l'échantillonnage des sections critiques. Dans les lignes qui suivent, les principales activités requises pour la validation de la fiabilité d'une structure seront présentées :

### 1.Chargements, géométrie et matériau :

- Identifier les chargements réels ;
- Modéliser la géométrie ;
- Choisir le matériau ;
- Analyser par ÉF et optimiser la géométrie.

### 2.Estimation de la durée de vie de la structure avec une fiabilité $R = XX.X\%$ :

- Sélectionner l'objectif de fiabilité approprié :
  - ✓ Conséquences potentielles d'une défaillance (préalable AMDEC) ;
  - ✓ Choix du critère d'acceptabilité de la probabilité de défaillance.
- Rassembler toutes les données liées aux chargements, géométrie et propriétés du matériau ;

- Déterminer analytiquement la courbe S-N du matériau pour la fiabilité requise :
  - ✓ Déterminer la contrainte équivalente ( $\sigma_{eq.}$ ) admise dans la section critique ;
  - ✓ Optimiser la géométrie en fonction de ( $\sigma_{eq.}$ ).
- Dédurre, à partir de la courbe S-N, la contrainte équivalente pour des tests accélérés ( $\sigma_{eq.a}$ ) ; voir la figure 22.

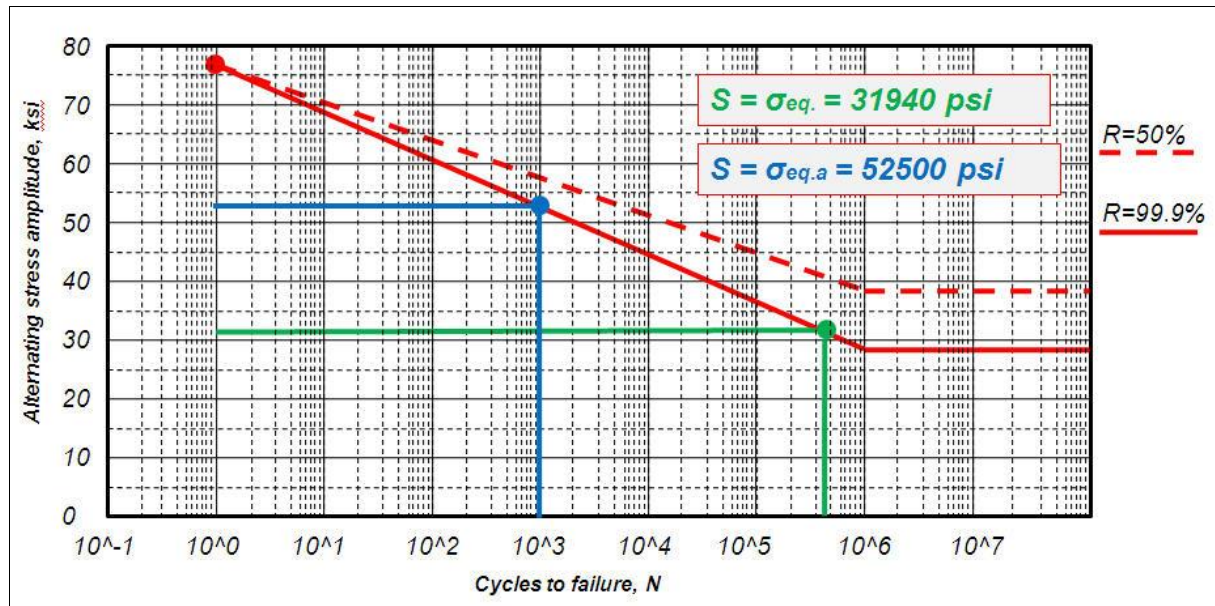


Figure 22: Exemple d'une estimation de la contrainte équivalente pour les tests accélérés [60]

### 3. Simulation numérique du cyclage :

- Réaliser la conception CAO du montage (machine d'essais + châssis + gabarit) ;
- Analyser numériquement la contrainte équivalente ( $\sigma_{eq.}$ ) dans les sections critiques pour plusieurs cas de cyclage pour la durée de vie souhaitée ;
- Identifier les chargements à appliquer sur la machine de tests.

### 4. Fabrication du montage pour les essais en laboratoire :

- Réaliser le montage (machine d'essais + prototype + gabarit) ;
- Établir le système de transmission des chargements du vérin vers la structure ;
- Réduire le plus possible les jeux dans l'assemblage pour une bonne distribution des forces dans la structure.

### 5. Prototype soumis aux essais en laboratoire :

- Assurer la rigidité du montage ;
- Choisir le point optimal d'application de la charge ;

- Appliquer sur le montage les chargements cycliques calculés et simulés précédemment ;
- Effectuer plusieurs types de chargements en fonction du type de pièce testée (ex. : dans le cas du châssis, une torsion en même temps qu'une flexion sera requise).

#### **6. Validation de la durée de vie de la structure :**

- Traiter les données recueillies suite aux essais sur la machine de tests ;
- Comparer les résultats du test avec ceux des simulations numériques ;
- Optimiser et valider la courbe S-N si plusieurs tests sont effectués pour la même combinaison géométrie/matériau.

#### **7. Conception et simulation des échantillons :**

- Modéliser plusieurs échantillons des zones critiques identifiées précédemment ;
- Concevoir le gabarit et établir le montage pour la fixation sur la machine de test ;
- Simuler le montage en ÉF ;
- Déterminer la force à appliquer sur la machine de tests ainsi que la distribution de la charge et de la contrainte équivalente.

#### **8. Fabrication du montage des échantillons :**

- Réaliser le montage (machine d'essais + échantillon + gabarit de fixation) ;
- Établir le système de transmission des chargements du vérin vers la structure ;
- Réduire les jeux dans l'assemblage.

#### **9. Échantillons soumis aux tests en laboratoire :**

- Appliquer sur le montage les chargements calculés à l'étape 7 ;
- S'assurer que tous les échantillons seront testés dans des conditions similaires ;
- Effectuer des tests accélérés afin d'optimiser la courbe S-N pour un nombre réduit de cycles (ex. : 3 échantillons pour 100 cycles, 3 pour 500 cycles, 3 pour 1000 cycles et 1 pour 100000 cycles).

#### **10. Validation de la fiabilité du produit :**

- Comparer les résultats des tests avec ceux des calculs analytiques ;
- Acquisition possible des contraintes réelles pour rétroaction et optimisation du facteur de sécurité.

Les activités mentionnées ci-haut seront intégrées dans le processus de développement de produits. La figure 21 présente d'une manière plus compacte et générale (prescriptive) les étapes de la méthodologie descriptive illustrée dans la figure 15. Les boîtes rouges dans la

figure 23 sont des étapes à franchir dans le PDP et incluent toutes les activités nécessaires pour la validation de la fiabilité d'une pièce structurale.

Plus spécifiquement, si la conception et la fabrication des prototypes est trop dispendieuse, la validation expérimentale peut être accomplie en analysant les zones les plus critiques. Donc plusieurs échantillons de ces zones seront fabriqués et testés dans le but de voir si la structure respecte les critères mécaniques et afin de réaliser une comparaison entre les différentes techniques d'assemblage.

Cette nouvelle approche a été appliquée pour analyser le comportement en fatigue des plusieurs types de joints, par William Rougé, étudiant à la maîtrise au Département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke et membre de l'équipe APC au Centre de Technologies Avancées. Des tests sont présentement en cours et les résultats de ces derniers se retrouveront dans son mémoire de maîtrise.

Si on retourne à la méthodologie générale de conception et de validation de produits de la figure 15, ces activités d'échantillonnage ont été intégrées dans le PDP à l'étape de validation numérique (1 et 2) et expérimentale (3, 4 et 5).

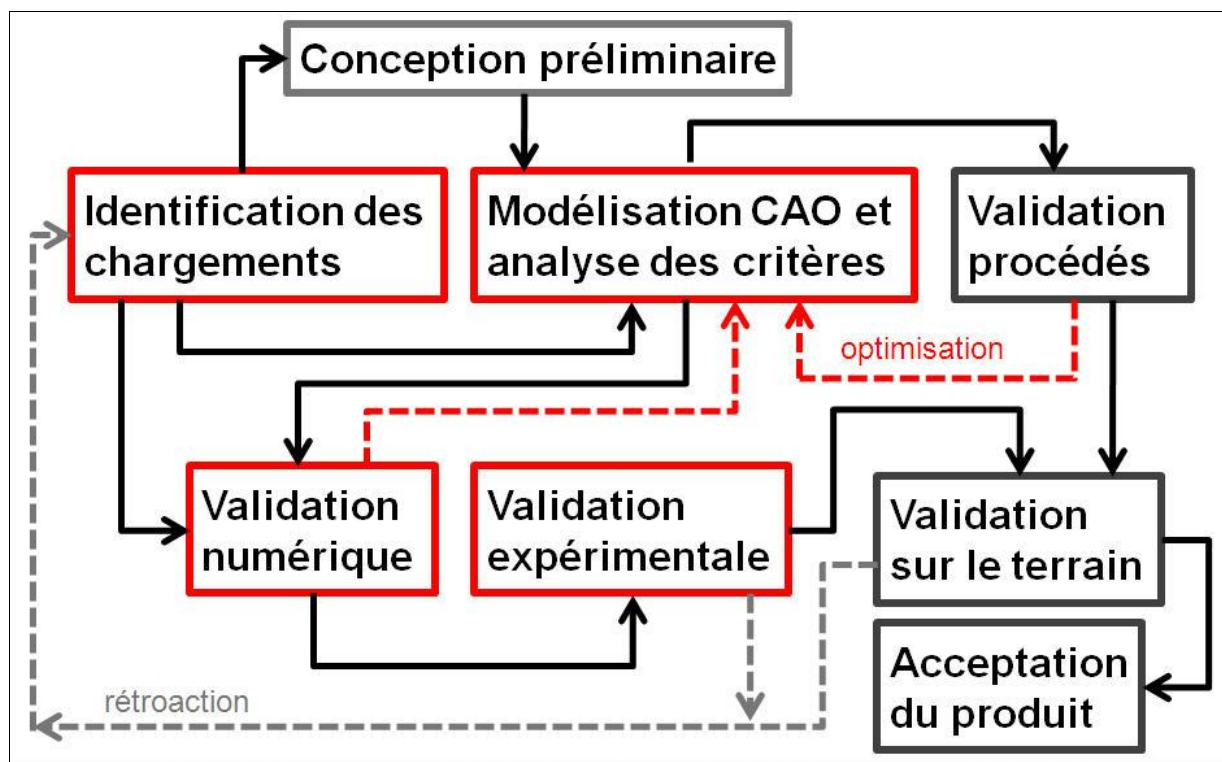


Figure 23: Synthèse du PDP proposé pour l'industrie des produits récréatifs

Plusieurs procédures de validation en fatigue sont détaillées dans l'annexe A. Une grande contribution à l'élaboration de ces procédures a été fournie par Stéphane Kannapel et Philippe Pellerin, ingénieurs stagiaires au Département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke. Les procédures d'utilisation de la machine de traction MTS ont été rédigées et intégrées dans la thèse, dans le but d'offrir un outil plus efficace d'apprentissage sur l'utilisation de la machine. Si le produit requiert une conception complexe qui exige des conditions fonctionnelles serrées, une validation dimensionnelle du produit devrait également être effectuée afin de démontrer aux clients la conformité du produit livré. Dans le cas de produits complexes comme la carrosserie, cette étape requiert beaucoup de temps et provoque souvent des retards dans le processus de développement de produits. Même si à la phase de conception détaillée, une telle validation dimensionnelle ne s'impose pas pour la réalisation des prototypes, les ingénieurs doivent néanmoins préparer le processus et les outils nécessaires aux mesures, évitant ainsi une augmentation du temps de développement du produit. L'intégration de certaines activités de validation dimensionnelle dans les étapes de conception détaillée pourrait donc diminuer le temps de développement si elles sont effectuées en parallèle avec les activités de conception. Ainsi, quelques exemples d'activités liées au processus de validation dimensionnelle, qui pourraient être effectuées en parallèle avec les activités de conception détaillée, ont été identifiés : (1) établir les points à mesurer, les vecteurs directeurs correspondants et les axes de mesure, (2) établir les champs de tolérance pour les points choisis, (3) établir la position du produit sur la machine de mesure ou dans le cas de produits complexes (ex : projecteur), concevoir et réaliser le dispositif de fixation du produit sur la machine, (4) écrire le programme pour la machine de telle manière que le temps de mesure soit minimal. Une fois ces activités préliminaires accomplies aux étapes de conception détaillée, les ingénieurs ont simplement à compléter la validation dimensionnelle en analysant les résultats du processus de mesure et en effectuant les corrections nécessaires selon le cas.

La validation des procédés de fabrication est également une étape très importante à la fin de laquelle l'équipe de projet doit faire un choix sur le procédé le plus approprié à implémenter sur la chaîne de production. Ici plusieurs critères seront pris en compte : durée de vie, coût de fabrication, temps de production, poids du produit, assemblage, maintenance, capacité de l'entreprise d'intégrer les nouvelles technologies, etc.

Les tests dans des conditions réelles d'utilisation représentent l'étape finale de validation du produit du point de vue de l'ingénierie. À ce niveau d'avancement du processus de développement de produit, les éventuelles itérations engendreraient des dépenses et des dépassements d'échéances avec des conséquences économiques difficiles à surmonter. Les tests réels représentent enfin une opportunité pour les ingénieurs de recueillir de nouvelles données concernant le comportement du produit dans des conditions réelles d'utilisation et de faire une rétroaction sur les exigences concernant les cycles de chargements.

Enfin, la validation finale se fera avec le client (validation du client) pour s'assurer que les besoins de ce dernier sont pleinement satisfaits.

Dans le cas d'une composante structurale comme le châssis ou le «swing arm» d'un véhicule récréatif, la voix du client sera traduite par l'opinion de celui-ci sur le comportement du véhicule sur la route (rigidité, fiabilité, sécurité, esthétisme, etc). Mais, avant de la mise en production du produit, le client n'aura pas l'accès à ce dernier. En plus, la confidentialité du projet pourrait être compromise si on permet l'accès du client au nouveau véhicule.

Par contre, les vérifications et les évaluations de la conception en fonction des besoins du client, sont déjà formalisés dans le cadre de l'ingénierie simultanée et aucunement la voix du client ne doit être écartée durant le développement du produit. La voix du client représente donc, un critère incontournable pour valider le produit, de le début jusqu'à la fin du PDP.

Dans ce contexte, le client peut donner son opinion par rapport aux critères de conception du fabricant, sans avoir la possibilité de comparer le produit avec des produits concurrents (dans ce cas, on parle d'une approche de conception absolue), ou il peut également s'exprimer par rapport aux produits de la concurrence, qui sont disponibles sur le marché (dans ce cas, il s'agit d'une approche de conception relative).

Dans ce chapitre le développement des nouvelles approches théoriques de conception et de validation a été présenté. Afin de souligner l'efficacité des approches développées, ceux-ci ont été appliqués dans un contexte industriel, plus exactement dans le PDP d'un nouveau châssis pour un véhicule récréatif.



## CHAPITRE 4 ANALYSE ET VALIDATION DE L'APPROCHE

Cette section est dédiée à l'analyse et la validation de la méthodologie développée dans deux milieux différents : le milieu académique et le milieu industriel. Dans un premier temps, l'approche a été présentée à la conférence CEEA (Canadian Engineering Education Association) et par la suite, elle a été appliquée à un projet réel dans l'industrie des produits récréatifs.

### 4.1 Validation en milieu académique

La première présentation sur l'état de l'art dans le domaine du développement de produits a eu lieu à la conférence CEEA à Kingston (ON) du 6 au 8 juin 2010. L'article 1 représente un survol de la littérature existante et propose brièvement quelques perspectives de développement des méthodologies de conception et validation plus spécifiques dont l'objectif est d'améliorer les PDPs existants et d'en proposer également une vulgarisation.

La méthodologie de conception et validation proposée dans la section 3.2 du présent document a été révisée par la commission d'évaluation de la conférence CEEA2011. La forme de l'article 3 qui a été intégré dans le présent document à la section 3.1.3. est celle modifiée suite aux commentaires et recommandations faites par la commission d'évaluation de la conférence.

L'article a été présenté avec succès à la conférence CEEA tenue entre les 7 et 9 juin 2011 à St. John's (TL), les participants montrant beaucoup d'intérêt envers les approches abordées dans ce livrable. L'aspect original concernant la formalisation des trois types de critères de conception (voir la section 3.1.1), ainsi que la possibilité d'intégrer la méthodologie proposée dans le curriculum du Département de génie mécanique à l'UdeS ont été mis en valeur durant cette conférence.

Plus spécifiquement, l'article 2 se penche sur les étapes de conception et d'optimisation basées sur les critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> rang (*la durée de vie, la fiabilité, la limite en fatigue, la résistance à la rupture, la limite de déflexion, etc.*), qui impliquent toujours le calcul d'un facteur de sécurité. L'intégration des approches déterministes et stochastiques a été étudiée et est appuyée par un exemple tiré de l'industrie des produits récréatifs dans lequel une géométrie a été conçue et optimisée grâce aux approches proposées,

tout en respectant les critères de conception de 1<sup>er</sup> rang étudiés : *la durée de vie et la fiabilité* (voir la section 3.2.2). La forme de l'article 2 a été révisée suite aux commentaires et recommandations faites par la commission d'évaluation de la conférence CEEA et il a été présenté devant plusieurs professeurs et titulaires de chaires œuvrant dans le domaine de la conception à Winnipeg entre les 17 et 20 juin 2012.

Les approches théoriques développées dans le cadre du projet de recherche ont fait également l'objet d'un article soumis et accepté le 20 décembre 2012 par le « European Scientific Journal », revue internationale qui publie mensuellement des articles de recherche dans le domaine des sciences. L'article 4 dans sa forme finale est disponible à l'annexe E de la présente thèse.

## 4.2 Validation en milieu industriel

Afin de valider la méthodologie proposée dans un contexte industriel, celle-ci a été présentée et appliquée au CTA (Centre de Technologies Avancées) dans le cadre du projet APC (Automotive Partnership Canada). Le Centre de Technologies Avancées créé par BRP (Bombardier Recreational Product) en partenariat avec l'UdeS (Université de Sherbrooke) œuvre, entre autres, sur le développement des nouvelles technologies et méthodes des fabrication spécifiques à l'industrie de véhicules récréatifs. Dans la figure 24, une maquette non-fonctionnelle du véhicule à trois roues, est illustrée.



**Figure 24: Maquette du Roadster à trois roues**

Un des défis du projet est de garder les mêmes performances que le roadster actuel (puissance, vitesse maximale, accélération), tout en réduisant la masse du système structurel du véhicule. Plus spécifiquement, l'objectif industriel est d'intégrer la méthodologie de conception et validation de pièces structurales dans le processus de développement des produits récréatifs afin d'obtenir un maximum d'efficacité en termes de respect des critères de conception, de niveaux de validation et de satisfaction des besoins du client.

#### 4.2.1. Développement d'un nouveau châssis pour un produit récréatif

Le développement du véhicule à trois roues aura un impact environnemental positif, parce que l'objectif du projet est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du véhicule de 50%. Pour réaliser cet objectif, la consommation sera également réduite de 50%, d'où la nécessité d'étudier la possibilité d'alléger le châssis, structure sur laquelle sont fixées toutes les composantes du tricycle et qui est actuellement surdimensionnée.

Une équipe d'étudiants en génie mécanique à l'Université de Sherbrooke ont travaillé sur le développement du châssis. Cette équipe comprend :

- Maxime Tacher (étudiant à la maîtrise) qui a œuvré sur la génération des concepts fonctionnels ;
- Yann Mogenot (étudiant à la maîtrise) qui a œuvré sur l'analyse des procédés de fabrication et d'assemblage ;
- Cristian Iorga (étudiant au doctorat) qui a œuvré sur le développement d'une méthode de validation numérique et expérimentale du châssis de référence et sur la formalisation du PDP;
- William Rougé (étudiant à la maîtrise) qui a œuvré sur l'optimisation des procédés d'assemblage et sur la validation expérimentale du concept final.

Tout d'abord, il a été nécessaire de définir quelques éléments géométriques qui seront utiles au processus de développement de produit, tout au long du projet. Les tableaux 4 et 5 regroupent les composantes de référence du véhicule avec leurs poids et les coordonnées de leurs barycentres. Ces données seront utilisées pour calculer la distribution des forces sur le châssis en fonction du type de chargement (flexion, torsion, flexion+torsion).

Tableau 4: Les points géométriques de référence pour le calcul des chargements du véhicule Roadster tricycle1

| Composantes                              | Point géométrique | Poids (kg) | Centre de masse de la composante mécanique selon l'origine du véhicule |        |        |
|--|-------------------|------------|--|--------|--------|
|  |                   |            | X (mm)   | Y (mm) | Z (mm) |
| <b>Pilote :</b>                          | CG <sub>pi</sub>  | 100        | 254  | 0      | 600    |
| <b>Passager :</b>                        | CG <sub>pa</sub>  | 112        | 565  | 0      | 665    |
| <b>Bagages av. :</b>                     | CG <sub>b</sub>   | 44         | 1119   | 0      | 91     |
| <b>Moteur :</b>                          | CG <sub>m</sub>   | 48,5       | 426  | -1     | 226    |
| <b>Batteries :</b>                       | CG <sub>a</sub>   | 60         | 429  | -3     | -119   |
| <b>Roadster tricycle1 plein charge :</b> | CG <sub>v</sub>   | 703        | -155   | 10     | 267    |

Tableau 5: Les points géométriques de référence pour le calcul des chargements du véhicule Roadster tricycle2

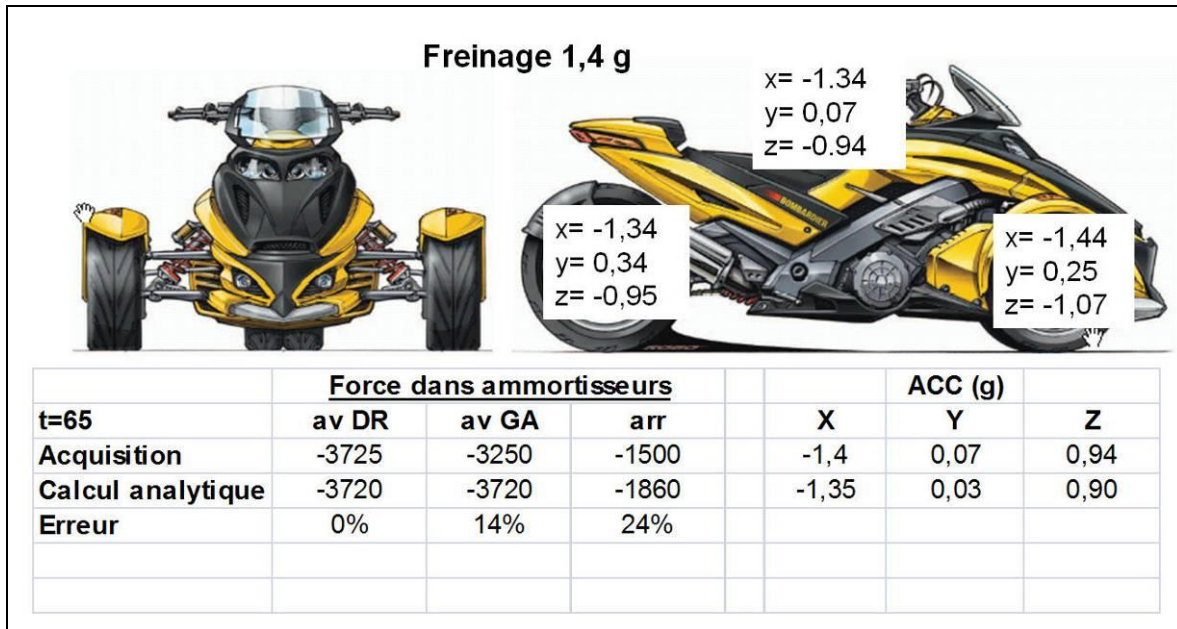
| Composantes                              | Point géométrique | Poids (kg) | Centre de masse de la composante mécanique selon l'origine du véhicule |        |        |
|--|-------------------|------------|--|--------|--------|
|  |                   |            | X (mm)   | Y (mm) | Z (mm) |
| <b>Pilote :</b>                          | CG <sub>pi</sub>  | 100        | 205  | 0      | 855    |
| <b>Passager :</b>                        | CG <sub>pa</sub>  | 112        | 555  | 0      | 913    |
| <b>Bagages av. :</b>                     | CG <sub>b</sub>   | 44         | 1119   | 0      | 91     |
| <b>Moteur :</b>                          | CG <sub>m</sub>   | 48,5       | 415  | 0      | 368    |
| <b>Roadster tricycle2 plein charge :</b> | CG <sub>v</sub>   | 625        | -295   | 0      | 288    |

#### 4.2.2. Identification des chargements

L'objectif de cette étape est d'appréhender les facteurs influençant le comportement dynamique du tricycle et d'établir, avec un maximum de précision, tous les chargements qui pourraient agir sur la structure étudiée. Une durée de vie sera également estimée afin d'établir les spectres de cyclage qui seront retenus pour les tests en fatigue du nouveau châssis.

Les données du tableau 6 nous ont aidé à déterminer les cas de chargements les plus pertinents pour le calcul de la durée de vie et pour les tests en fatigue du châssis. Ainsi, à la suite d'une analyse sur le terrain, trois spectres de cyclage seront retenus pour l'analyse de la durée de vie du châssis, soit : **1) Le freinage ; 2) Le freinage + dos d'âne et 3) Le virage**. On a établi que ces trois types de chargement cyclique surviennent le plus fréquemment durant la vie utile d'un véhicule récréatif à trois roues.

**Tableau 6: Forces et accélérations mesurées expérimentalement durant l'essai sur route pour l'analyse en fatigue du châssis**



Dans les deux cas de freinage, le transfert des charges a été calculé avec la formule :

$$\Delta P = M * \gamma * \frac{h}{l} \quad (1)$$

Où

**M** – la masse du véhicule (kg) ;

**γ** – l'accélération (g) ;

**l** – distance sur l'axe X entre le centre des roues avant et le centre de la roue arrière (mm) ;

**h** – distance sur l'axe Z entre le barycentre du véhicule et le sol.

Le transfert de chargement dépend donc de la masse du véhicule, de son empattement et de la hauteur du barycentre. Plus le barycentre est haut, plus l'empattement est court et plus les forces sous l'effort de freinage seront importantes.

Lors du freinage, la décélération va surcharger les roues avant et va relaxer la roue arrière produisant ainsi un transfert de chargement. En contrepartie, lors d'un démarrage, un transfert de chargement se produit de l'avant vers l'arrière.

Un transfert de chargement entre les roues avant se produit également lors d'un virage. Par exemple, si le pilote tente un changement de direction inscrivant le véhicule sur une trajectoire circulaire de rayon **R<sub>g</sub>** à une vitesse **V**, la rotation du guidon entraînera un braquage des roues

via le système de direction. Instantanément, le braquage des roues avant va générer des efforts transversaux  $F_{4y}$  et  $F_{5y}$  appelés poussés de dérive, qui font naître l'accélération transversale  $\gamma_t$  :

$$\gamma_t = \frac{v^2}{R_g} \quad (2)$$

La distribution des chargements dans le cas d'un virage est présentée à la figure 25. La force centrifuge  $F_{1y}$  a été décomposée suivant les réactions  $F_{3y}$  et  $F_{2y}$ . À son tour, la force transversale  $F_{2y}$  a été décomposée en composantes  $F_{4y}$  et  $F_{5y}$ , à cause de l'effet de transfert de chargements transversaux entre les roues avant. Les calculs de forces ont été effectués pour une accélération de  $\gamma_t = 0,5 \text{ g}$ .

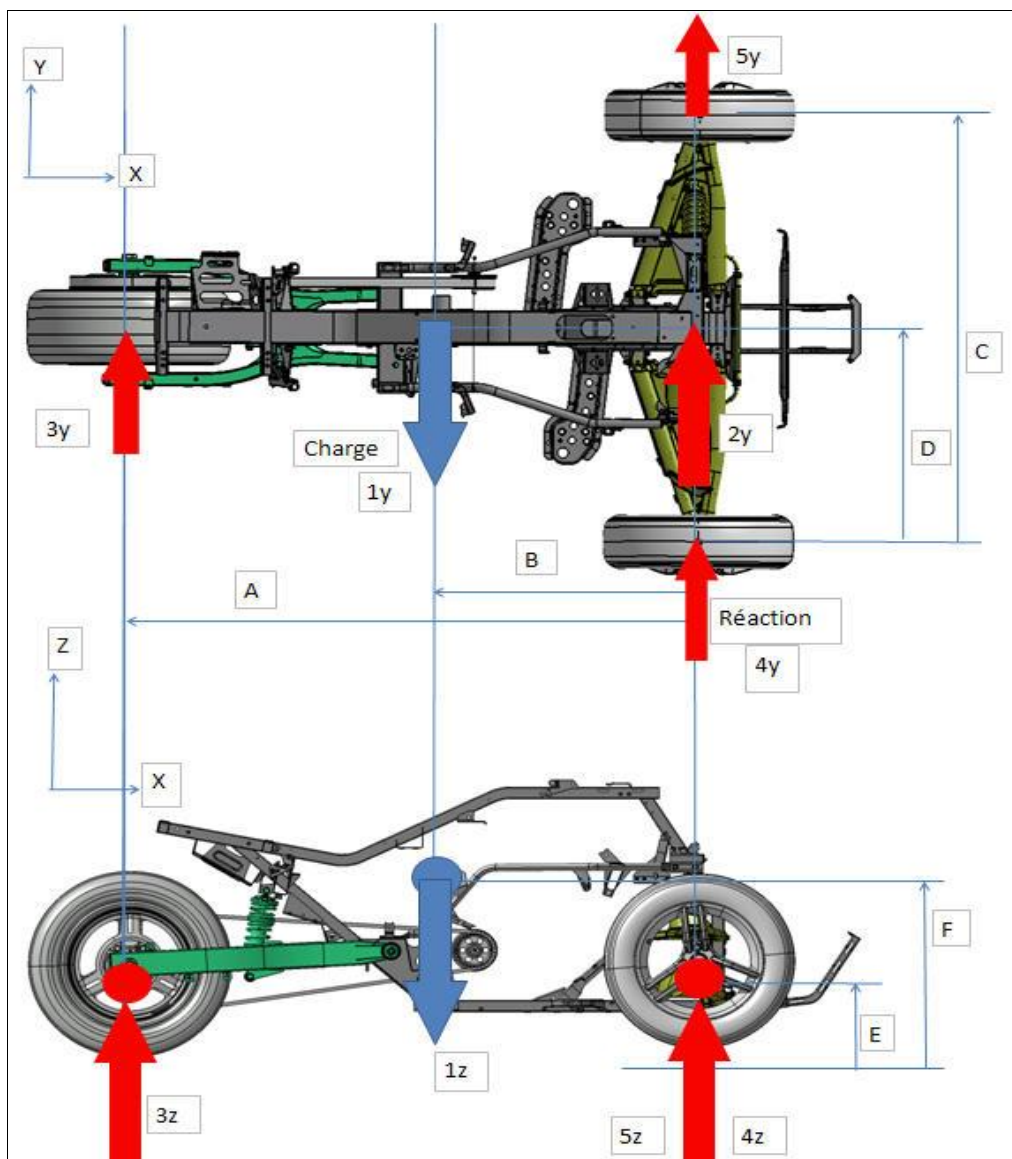


Figure 25: Diagramme du corps libre (DCL) pour le calcul des chargements en virage

Les résultats du calcul analytique des chargements sont présentés dans le tableau 7. Il faut mentionner que les calculs des chargements réels pour les cas de freinage et freinage + dos d'âne ont été effectués par Maxime Tacher et ont fait l'objet de son mémoire de maîtrise [61].

**Tableau 7: Résultats du calcul analytique correspondant aux cas de chargements sur route**

| Chargement                  | A (m)                       | B (m) | C (m) | D (m) | E (m) | F(m) | F1 (N)      | F2 (N)       | F3 (N)       | F4 (N)       | F5 (N)       |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Y</b>                    | 1,708                       | 0,808 | 1,384 | 0,692 | 0,3   | 0,59 | 3448        | -1817        | -1631        | -1289        | -528         |
| <b>Z</b>                    | 1,708                       | 0,808 | 1,384 | 0,692 | 0,3   | 0,59 | 6894        | -3633        | -3261        | -2578        | -1055        |
| <b>Résultante de forces</b> | <b>Virage</b>               |       |       |       |       |      | <b>7709</b> | <b>-4062</b> | <b>-3647</b> | <b>-2882</b> | <b>-1180</b> |
|                             | <b>Freinage</b>             |       |       |       |       |      | <b>x</b>    | <b>x</b>     | <b>-2160</b> | <b>-3720</b> | <b>-3720</b> |
|                             | <b>Freinage + Dos d'âne</b> |       |       |       |       |      | <b>x</b>    | <b>x</b>     | <b>-5000</b> | <b>-5236</b> | <b>-5236</b> |

Le nombre de cycles pour chaque type de chargement a été estimé à la suite d'un trajet dont j'ai effectué dans la ville de Sherbrooke sur une distance de 10 km sur une route avec plusieurs dénivellations, courbes et nids de poules. Toutes les données concernant l'occurrence des cas de chargements ont été recueillies sur le terrain et compilées dans le tableau 8.

**Tableau 8: Nombre de cycles par type de chargement**

| <b>Virage (cycles)</b> | <b>Freinage (cycles)</b> | <b>Freinage + Dos d'âne (cycles)</b> | <b>Distance parcourue (km)</b> | <b>Durée de vie estimée (Années)</b> |
|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 35                     | 25                       | 25                                   | 10                             |                                      |
| 35000                  | 25000                    | 25000                                | 10000                          | 2                                    |
| 175000                 | 125000                   | 125000                               | 50000                          | 10                                   |

À cette étape, l'instrumentation d'un tricycle existant avec des jauges de déformation a permis de déterminer physiquement les déformations internes de la structure et les contraintes dans les zones les plus sollicitées. Étant donné la complexité de la géométrie, la méthode «Rosette» a été utilisée pour déterminer les déformations et les contraintes dans les points de contrôle. Voici donc les formules utilisées pour calculer la souche principale maximale, la souche principale minimale et par la suite la contrainte équivalente aux points d'intérêt :

1) Formules de Hooke:

$$\varepsilon_{\max.} = \frac{1}{2} * \{ \varepsilon_a + \varepsilon_c + \{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\min.} = \frac{1}{2} * \{ \varepsilon_a + \varepsilon_c - \{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} * \tan^{-1} [2 * \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c] / [\varepsilon_a - \varepsilon_c] \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\tau} = \{2 * [(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_{\max.} = E / [2 * (1 - \nu^2)] * \{ (1 + \nu) * (\varepsilon_b + \varepsilon_c) + (1 - \nu) * \{2 * [(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \} \quad (7)$$

$$\sigma_{\min.} = E / [2 * (1 - \nu^2)] * \{ (1 + \nu) * (\varepsilon_a + \varepsilon_c) - (1 - \nu) * \{2 * [(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \} \quad (8)$$

$$\tau_{\max.} = E / [2 * (1 + \nu)] * \{2 * [(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]\}^{1/2} \quad (9)$$

2) Formules de von Mises:

$$\sigma_a = \Delta\sigma / 2 = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (10)$$

$$\sigma_m = \Delta\sigma / 2 = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (11)$$

$$\sigma_{eq-a} = (\sigma_a^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (12)$$

$$\sigma_{eq-m} = (\sigma_m^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (13)$$

3) Formule de Goodman:

$$\sigma_{eq-CR} = \sigma_a / (1 - \sigma_m / S_{ut}) \quad (14)$$



Toutes les variables employées dans ces formules sont détaillées dans la liste des symboles qui se trouve au début du document.

Dans le cadre de cette méthode, le système e-DAQ d'acquisition de données a été utilisé. Les deux logiciels TCE\_v3.15 et EASE 3 (de la compagnie HBM, à Marlboro en MA/USA) ont été utilisés pour faire le réglage du système, pour la calibration des jauges, l'identification des signaux et l'interprétation des résultats. Cette étape s'avère très utile dans le PDP parce qu'elle valide en effet les chargements (forces) calculés analytiquement ou numériquement avec un logiciel de simulation dynamique (ex. Visual Nastran 4D 2002 de la compagnie MSC, à Santa Ana en Ca/USA).

Les résultats de cette méthode d'identification physique des chargements sont présentés à l'annexe D.

#### 4.2.3. Conception préliminaire et analyse des critères

Dans le cadre de cette étape, plusieurs solutions fonctionnelles ont été identifiées. Ainsi, à partir d'un châssis de référence qui équipe déjà le tricycle actuel, l'équipe a exploré plusieurs combinaisons géométrie/matériau qui pourraient répondre aux critères mécaniques établis à l'étape d'identification des chargements (critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> ordre) :

##### ➤ **Châssis de référence;**

La figure 26 présente la disposition du système châssis dans le roadster existant. Cette structure existe déjà sur les véhicules commercialisés actuellement et elle sera prise en considération en tant que concept de référence.

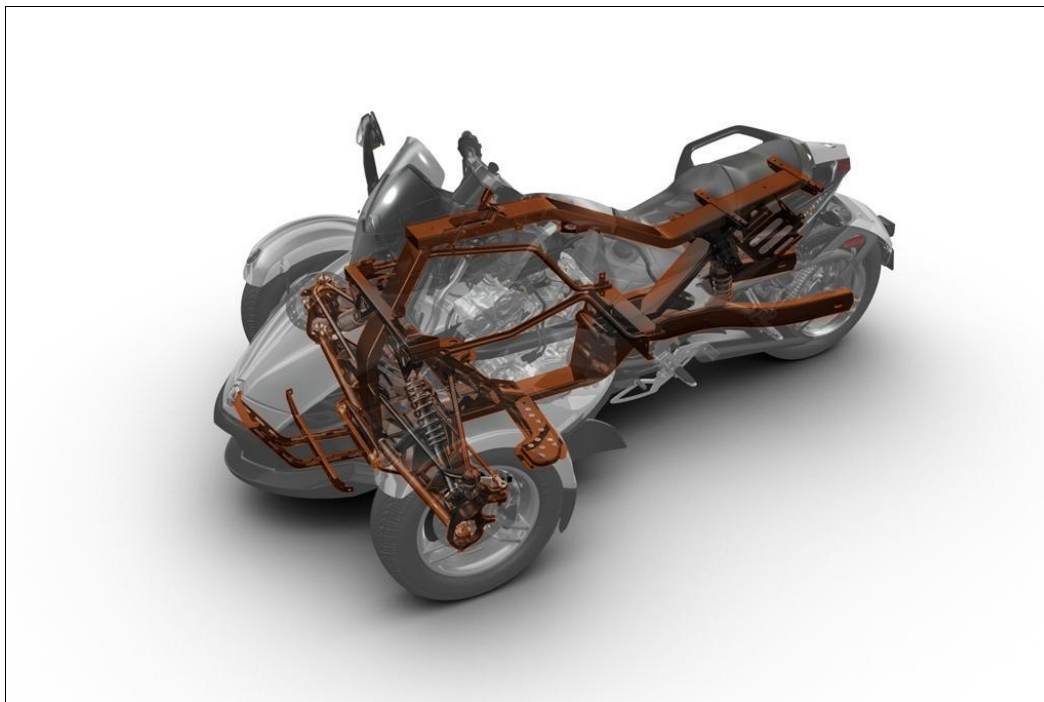


Figure 26: Le châssis du Roadster tricycle RS (existant)

Pour la validation de la méthodologie de conception et validation développée, la durée de vie du concept de référence sera déterminée en utilisant des méthodes analytiques, numériques et expérimentales.

➤ **Châssis 2D optimisé en aluminium** (figure 27) ;

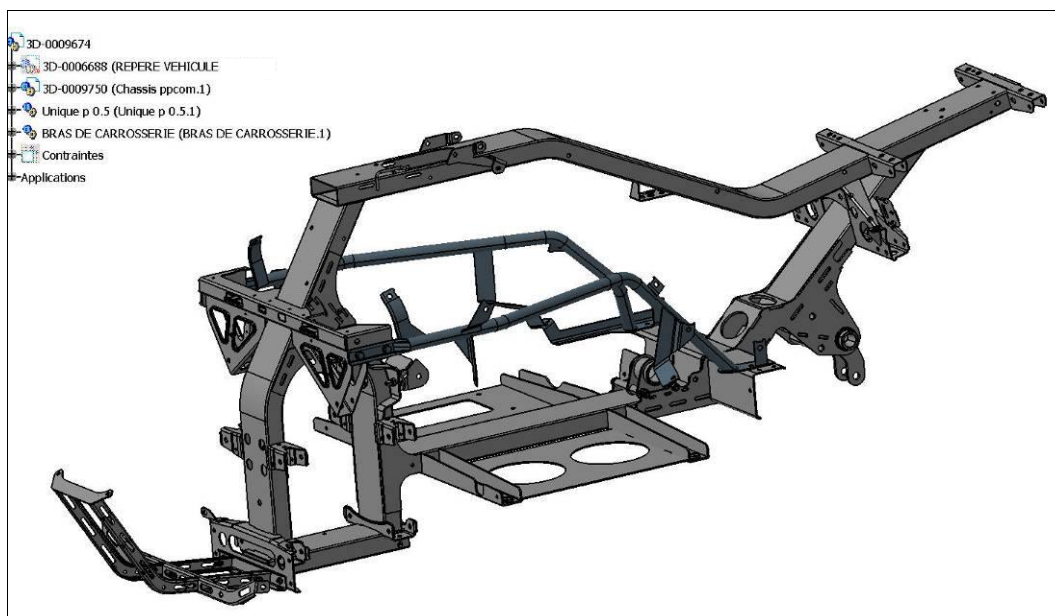
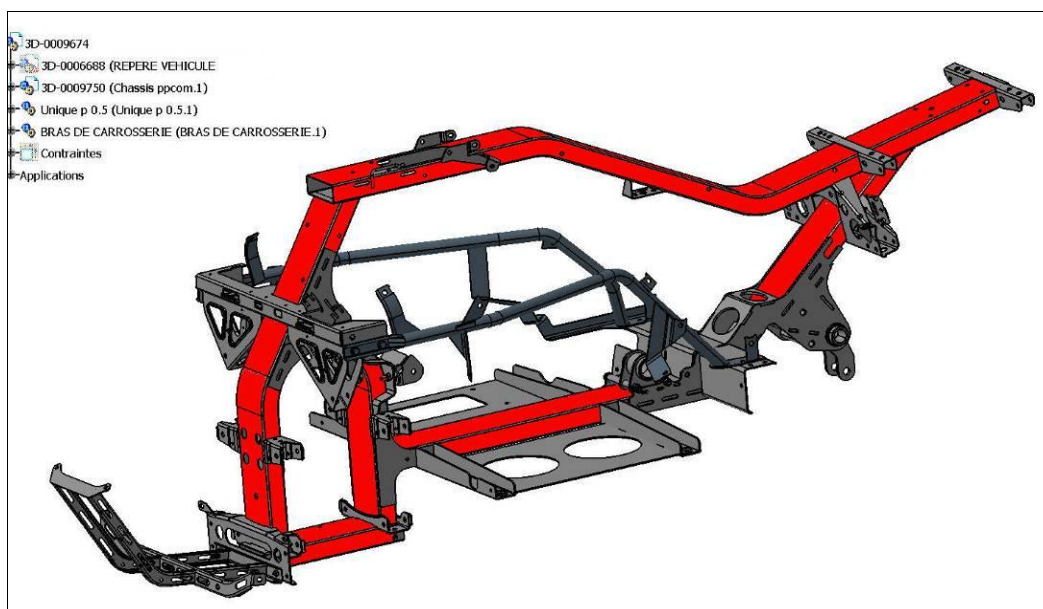


Figure 27: Ensemble châssis PROTOTYPE P\_0,5 optimisé aluminium [61]

Étant donné que le châssis actuel est considéré comme étant surdimensionné on a jugé pertinente la proposition d'un châssis dont la seule modification majeure par rapport au châssis existant serait le matériau. Bien sûr, une optimisation des profilés a été nécessaire afin d'assurer la rigidité de la structure, étant donné que la limite élastique du nouveau matériau (Alu. 6061-T6) est plus faible que celle du matériau utilisé actuellement sur la chaîne de fabrication (Acier ASTM-518). L'avantage de ce concept serait que sa géométrie est déjà disponible, mais il demande une attention accrue au niveau de la simulation par éléments finis afin d'éviter les déplacements trop élevés. Dans un tel cas, une optimisation de la géométrie du châssis sera donc, fortement recommandée.

➤ **Châssis 2D optimisé en acier (figure 28) ;**



**Figure 28: Ensemble châssis PROTOTYPE P\_0,5 optimisé acier [61]**

Comme il a été montré dans la figure 28, cette variante implique des modifications géométriques au niveau des poutres (les zones en rouge). Une diminution de la section des poutres a été effectuée afin d'alléger le châssis tout en gardant les caractéristiques mécaniques requises.

➤ **Châssis 3D en acier** (figure 29) ;

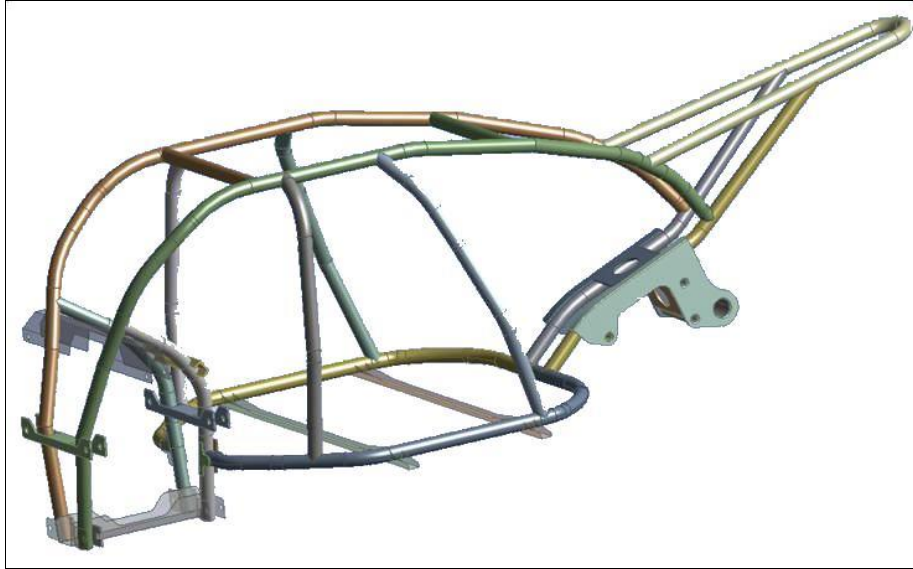


Figure 29: Nouveau concept de châssis 3D en acier [61]

Ce concept s'avère très intéressant parce qu'il rencontre en plus des critères mécaniques, un des critères de conception de 2<sup>ème</sup> ordre : la réduction de poids. En se rapportant donc au châssis 2D fabriqué en acier, le gain en masse pour le châssis 3D est de 18 kg, soit 44 % par rapport au châssis de référence et d'environ 5% de la masse totale du véhicule. Qui plus est, le comportement du châssis 3D-acier sous l'action des sollicitations mécaniques est meilleur que celui du châssis 2D actuel (voir le tableau 9). Dans le cas du châssis 3D, cet aspect s'explique par une meilleure distribution des forces dans la structure, due à l'architecture tridimensionnelle de cette dernière.

➤ **Châssis 3D en aluminium** (figure 30).

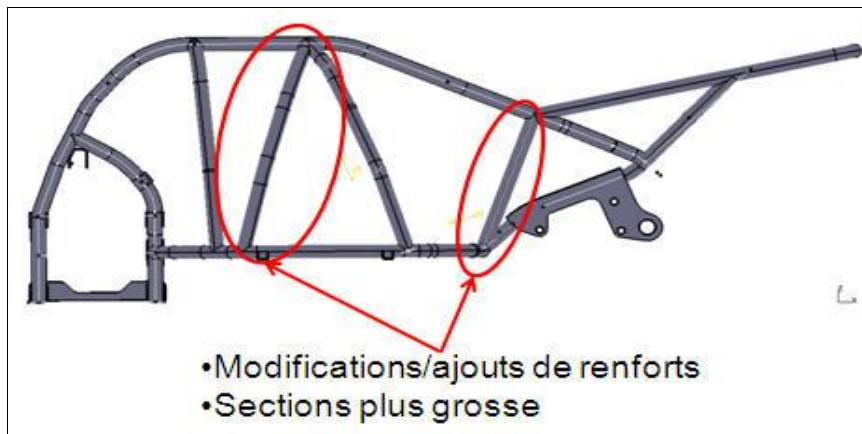


Figure 30: Nouveau concept de châssis 3D en aluminium [61]

Le quatrième concept sera très semblable au troisième, mais la conception a été effectuée pour l'aluminium et donc quelques renforts ont été rajoutés en raison de l'amplitude des déplacements dus aux chargements.

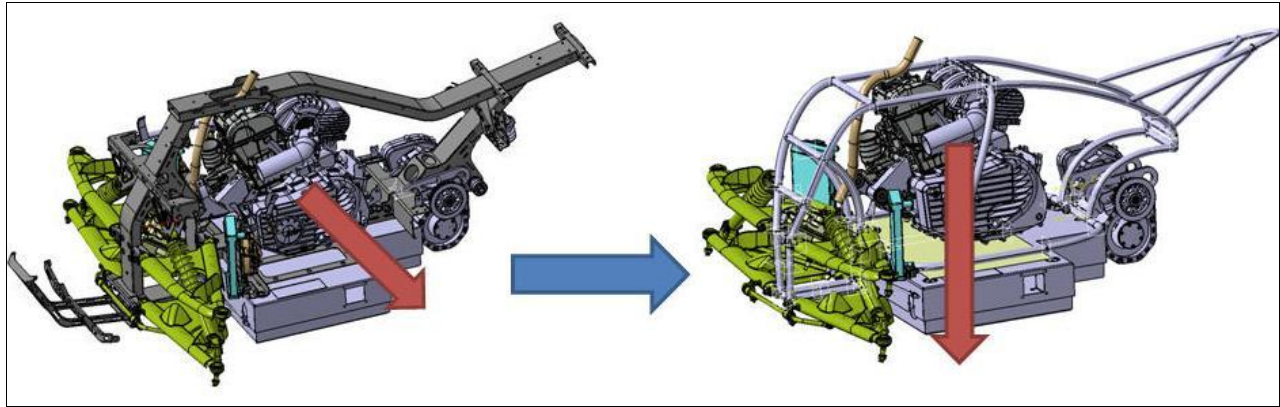
Les quatre concepts ont été modélisés dans l'environnement CATIA V5R19 et une analyse préliminaire par éléments finis a été effectuée dans l'environnement ANSYS pour chaque combinaison géométrie/matériau, afin de vérifier le comportement des structures sous l'action des chargements identifiés précédemment. Le tableau 9 permet une comparaison des nouveaux concepts par rapport au châssis existant, selon différents critères de conception (*masse, F.S., déformation maximale, et contrainte maximale*).

**Tableau 9: Comparaison de quatre concepts de châssis [61]**

| Critères                                 | Châssis de référence                                       | Châssis Acier 2D Optimisé                                     | Châssis Aluminium 2D Optimisé                                 | Châssis Acier 3D   | Châssis Alu 3D  |
|--|--|---|---|--|---|
| Masse (Kg)                               | 32.6   | 28.5  | 12  | 18.2   | 9.9   |
| Contraintes Maximales (MPa)              | Freinage : 140<br>Virage : 200<br>Frein. + dos d'âne : 170 | Freinages : 150<br>Virages : 250<br>Frein. + dos d'âne : 240  | Freinage : 125<br>Virages : 160<br>Frein. + dos d'âne : 190   | Freinage:110<br>Virage : 190<br>Frein. + dos d'âne : 160       | Freinages : 80<br>Virage : 180<br>Frein. + dos d'âne : 110    |
| Facteur de sécurité (F.S.)               | Freinage : 3.13<br>Virage : 1.9<br>Frein.+ dos d'âne : 2.1 | Freinage : 2.3<br>Virage : 1.4<br>Frein. + dos d'âne : 1.44   | Freinage : 2.16<br>Virages : 1.7<br>Frein. + dos d'âne : 1.42 | Freinage : 3.13<br>Virages : 2.88<br>Frein. + dos d'âne : 2.16 | Freinages : 3.43<br>Virages : 2.54<br>Frein.+dos d'âne : 2.54 |
| Déflexions maximales (mm)                | Freinage : 2.1<br>Virage : 3.1<br>Frein. + dos d'âne : 2.9 | Freinages : 2.6<br>Virages : 6.1<br>Freins. + dos d'âne : 4.4 | Freinages : 4.4<br>Virages : 7<br>Frein. + dos d'âne : 6.35   | Freinages : 1.31<br>Virage : 2.28<br>Frein. + dos d'âne : 1.85 | Freinage : 2.6<br>Virage : 9.2<br>Frein. + dos d'âne : 3.7    |
| Coût du matériau (\$/m)                  | ~23  | ~23   | ~25   | ~10  | ~7  |
| Coût de fabrication et d'assemblage (\$) | ~175\$   | ~149 \$ (-18 % par rapport au châssis existant)               | ~199\$ (+12 % par rapport au châssis existant)                | ~262 \$ (+33 % par rapport au châssis existant)                | ~277 \$ (+37% par rapport au châssis existant)                |

Suite à cette étape de génération des concepts, deux philosophies d'assemblage ont résulté (figure 31):

- Assemblage/Désassemblage latéral du sous-système moteur, indépendamment du sous-système batteries (voir la figure 31 à gauche);
- Assemblage/Désassemblage du sous-système moteur par le dessous, contraint par l'assemblage/désassemblage du sous-système batteries (voir la figure 31 à droite).



**Figure 31: Assemblage/Désassemblage des sous-systèmes moteurs et batteries [61]**

L'impact sur le cycle de vie du véhicule des contraintes d'assemblage générées par les deux philosophies et illustrées dans la figure 31 représente un autre critère important (critère qualitatif) pour les ingénieurs dans leur démarche de convergence des concepts.

Ce processus de convergence a fait l'objet des travaux effectués par Maxim Tacher [61].

#### 4.2.4. Validation numérique

Dans le cadre du projet de ROADSTER TRICYCLE1, l'équipe chargée avec l'allègement du châssis a utilisé deux méthodes de validation : AÉF1 et AÉF2. Dans les sous-sections suivantes, les résultats des simulations AÉF1 et AÉF2 seront présentés.

##### 4.2.4.1 Validation numérique statique AÉF1 (N1a)

Cette étape sert à valider numériquement la structure sous les chargements réels identifiés et à calculer la durée de vie de cette dernière. Le module d'analyse statique « Static Structural » du logiciel ANSYS a été utilisé pour effectuer les simulations afin de vérifier si les contraintes et les déplacements induits par les chargements appliqués ne dépassent pas les limites imposées par le constructeur. Pour ce faire, le facteur de sécurité imposé à l'étape de conception préliminaire sera également vérifié. La figure 32 montre les simulations AÉF1 faites pour le nouveau concept de châssis 3D en acier, présenté à la section 4.2.3 (figure 29), tandis que dans la figure 33 c'est le châssis de référence qui a été soumis à une simulation par éléments finis.



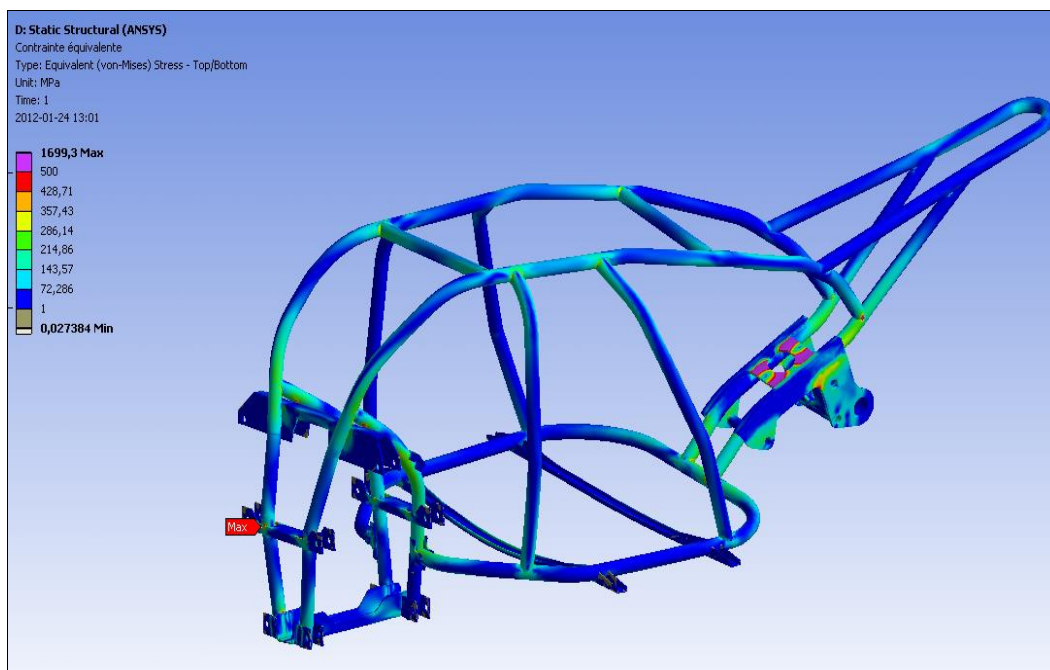


Figure 32: Simulation AÉF1 pour le châssis 3D-acier [61]

Pour l'étape de validation numérique et expérimentale, ce châssis de référence a été choisi parce que le coût et le temps de fabrication d'un châssis qui existe déjà sur la chaîne de fabrication sont moins élevés par rapport à un prototype du concept optimisé 2D aluminium et parce que la validation de l'approche développée est possible sur un produit existant.

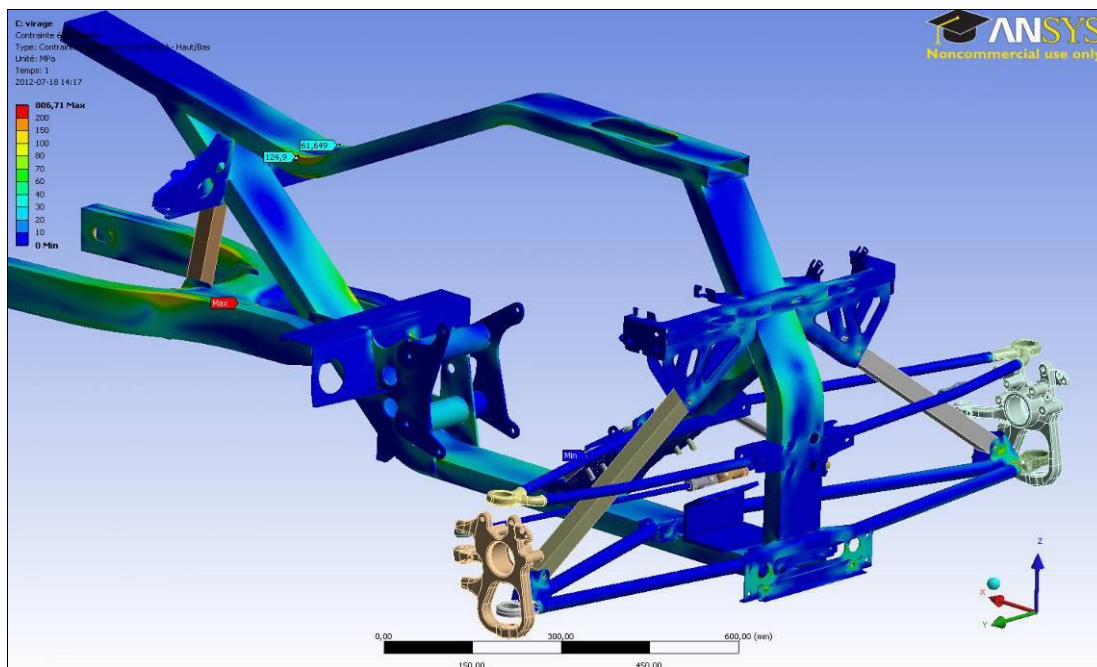


Figure 33: Simulation AÉF1 pour le châssis de référence

Après plusieurs itérations effectuées à l'étape AÉF1, l'équipe de conception a été en mesure de générer la combinaison optimale de géométrie et de matériau. Une fois que l'optimisation géométrique et topologique a été faite pour le concept choisi, l'équipe d'étudiants impliqué dans le projet a été en mesure de calculer la durée de vie de la structure.

Tout d'abord, la courbe S-N du matériau sera générée tout en tenant compte des divers facteurs qui affectent la tenue en fatigue de la structure (facteur de surface ( $k_a$ ) facteur de chargement ( $k_b$ ), facteur de corrosion ( $k_c$ ), facteur de taille ( $k_d$ ), facteur de fiabilité ( $k_e$ ), etc.). Le matériau qui est actuellement utilisé pour la fabrication du châssis est un acier ASTM 518 avec  $S_{ut} = 480$  MPa. Dans le présent document, les calculs pour déterminer la courbe S-N seront effectués pour le matériau mentionné ci-haut, parce qu'aucune décision n'a pas encore été prise concernant un éventuel changement de matériau.

➤ Pour le **facteur de surface**, la formule de Lipson et Noll a été utilisée :

$$k_a = a * S_{ut}^b,$$

où  $S_{ut}$  est la limite ultime et  $a$  et  $b$  sont le facteur et l'exposant qui peuvent être trouvés dans le tableau 6-2 de la référence [65]

$$k_a = 4,51 * 480^{-0,265} = 0,88$$

➤ Le **facteur de chargement** dépend du type de sollicitation appliqué à la structure. Dans le cas du châssis étudié il y aura deux types de sollicitations, soit la flexion et torsion + flexion. Étant donné que le facteur  $k_{b,flexion} = 1$  et  $k_{b,torsion} = 0.6$ , on a estimé le facteur de chargement pour notre application  $k_b = 0.8$ , soit la moyenne des deux valeurs.

➤ Le **facteur de corrosion**  $k_c = 1$  parce que dans des conditions normales d'opération, le véhicule ne sera pas utilisé dans un milieu extrêmement corrosif.

➤ Le **facteur de taille**  $k_d$  n'a aucun effet sur la limite d'endurance pour les sollicitations axiales. Les facteurs de taille pour flexion et torsion peuvent être déduits des relations suivantes [65]:

$$k_d = \begin{cases} (d/7,62)^{-0,107} = 1,24 * d^{-0,107} & \text{pour } 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & \text{pour } 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Si on prend en considération une structure tubulaire comme celle montrée dans la figure 32, le facteur de taille ( $k_d$ ) sera :

$$k_d = 1,24 * 26 \text{ mm}^{-0,107} = 0,88$$



➤ **Le facteur de fiabilité  $k_e$**  dépend de l'objectif de fiabilité établi par l'équipe multidisciplinaire à la phase de conception préliminaire où les ingénieurs ont effectué une AMDEC et où, en fonction des conséquences possibles d'une éventuelle défaillance, ils ont pris une décision en ce qui concerne le niveau de son acceptabilité. Dans le cadre du projet APC, on a considéré un objectif de fiabilité de 90%, objectif souvent utilisé dans l'industrie d'automobiles [60]. En effet le facteur de fiabilité représente une déviation standard de la limite d'endurance de 8% [60]. En utilisant donc le tableau des valeurs de la distribution normale de la référence [60] le facteur de fiabilité sera :

$$k_e = 0,9$$

Avec les facteurs qui affectent la limite d'endurance ( $S_e$ ), il sera possible de déterminer cette limite modifiée ( $S_{e'}$ ) pour le matériau choisi (ASTM 518 avec  $S_{ut} = 480$  MPa).

$$S_e = 0,5 * S_{ut} = 0,5 * 480 \text{ Mpa} = 240 \text{ Mpa}$$

$$S_{e'} = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S_e$$

$$S_{e'} = 0,88 * 0,8 * 1 * 0,88 * 0,9 * 240 \text{ Mpa} = \mathbf{134 \text{ MPa}}$$

La courbe S-N du matériau suite aux calculs des facteurs qui influent sur la limite d'endurance est présentée dans la figure 34. À partir de cette courbe, les ingénieurs seront capables d'estimer la contrainte maximale pour la durée de vie souhaitée, soit 425000 cycles (voir le tableau 8). Comme le graphique de la figure 34 le montre, la contrainte maximale admise devient  $\sigma_{e,max.} = 200$  MPa.

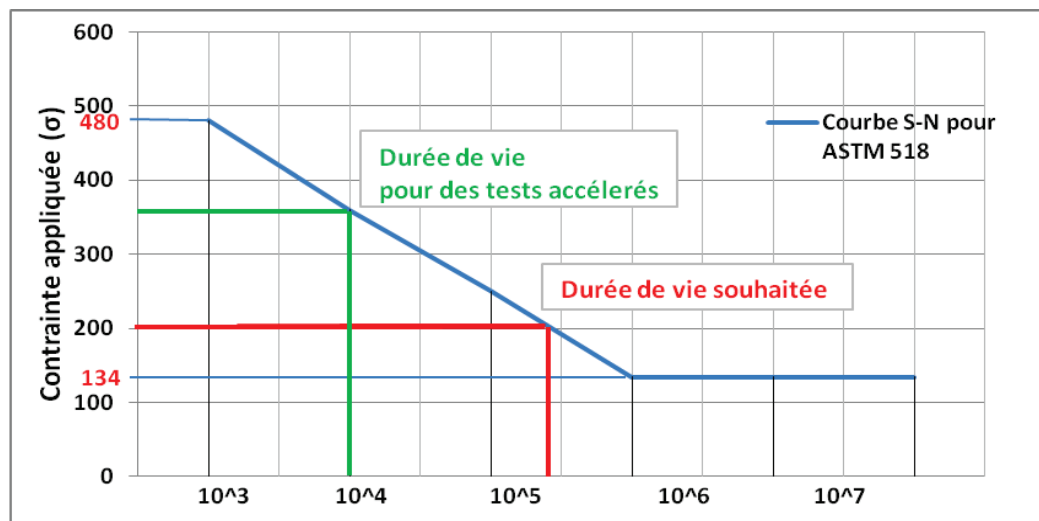


Figure 34: La courbe S-N déterminée en fonction des facteurs qui influent sur la limite d'endurance

Comme la figure 34 le montre, une fois que la contrainte maximale pour la durée de vie souhaitée a été déterminée, on pourra estimer les valeurs admissibles pour les tests accélérés.

Par exemple, si on veut créer une procédure de cyclage de 10000 cycles, on détermine la valeur de la contrainte maximale correspondante qui se trouve sur l'ordonnée au même niveau que le point d'intersection entre la courbe S-N et la projection du point représentant le nombre de cycles. Dans la courbe S-N illustrée dans la figure 34, la contrainte maximale admise pour le test accéléré de 10000 cycles est  $\sigma_{a,max.} = 360 \text{ MPa}$ . Le tableau 10 centralise les résultats de l'analyse par éléments finis sur le châssis de référence à l'étape AÉF1. Les points de contrôle ont été choisis en fonction de leur criticité (voir l'annexe C).

Après avoir testé un véhicule existant sur la route, on a réalisé que le cas de freinage dans un dos d'âne n'est pas un cas de référence pour la durée de vie en fatigue. En réalité, ce cas de chargement représente plutôt une sollicitation d'impact parce que si le freinage à une décélération de 1,5 g est effectué dans un dos d'âne, la sécurité du pilote et notamment du passager est mise sérieusement en danger. Par exemple, une décélération de 1,5 g équivaut à l'arrêt dans une seconde, d'un véhicule qui roule à 55 Km/h. Si on rajoute à une telle décélération le dos d'âne la stabilité du pilote sera affectée. Donc, un tel cas de chargement n'arrivera probablement jamais dans la vie du véhicule dans des conditions normales d'utilisation et c'est la raison pour laquelle il a été décidé de combiner les cas de freinage et freinage dans un dos d'âne, pour arriver à un seul type de chargement, soit le freinage à une décélération de 1,7 g qui représente déjà un cas de chargement très sévère.

**Tableau 10: Valeurs des contraintes et des déplacements calculés à l'étape AÉF1 aux points de contrôle sur le châssis de référence**

| Résultats du calcul numérique de la $\sigma$ équiv. (AÉF1) |                |               |                |               |                                    |                                    |
|--|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Point de contrôle  | Virage         |               | Freinage       |               | Forces appliquées                  |                                    |
|  | $\sigma$ (MPa) | $\delta$ (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\delta$ (mm) | Virage                             | Freinage                           |
| P1   | 85             | 1,4           | 76             | 1             | Fg=1180 N<br>Fd=2882 N<br>Fa=3647N | Fg=3720 N<br>Fd=3720 N<br>Fa=2161N |
| P2   | 42             | 1,2           | 70             | 1,2           |                                    |                                    |
| P3   | 58             | 1,1           | 104            | 1,3           |                                    |                                    |
| P4   | 63             | 1,2           | 95             | 1             |                                    |                                    |
| P5   | 123            | 1,1           | 165            | 1,7           |                                    |                                    |
| P6   | 78             | 1,9           | 95             | 1,9           |                                    |                                    |
| P7   | 65             | 1,2           | 130            | 2,1           |                                    |                                    |
| P8   | 125            | 1,4           | 128            | 2             |                                    |                                    |

Comme le tableau 10 la montre, les valeurs des contraintes dans la majorité de points de mesure sont en dessus de la limite d'endurance du matériau. La valeur la plus élevée a été enregistrée dans le point P5, plus exactement sur la pièce de fixation inférieure de l'amortisseur. Donc, pour être en mesure de déterminer la durée de vie de la structure et de la valider expérimentalement, il a fallu appliquer des chargements un peu plus sévères. Une deuxième analyse par éléments finit a été donc mise en œuvre, afin de déterminer la fixation de la structure sur la machine de traction et d'établir le force à appliquer sur la machine.

#### 4.2.4.2 Validation numérique en fatigue AÉF2 (N2a)

L'étape de validation numérique en fatigue (AÉF2) représente le lien entre l'analyse théorique de la durée de vie de la structure et les tests expérimentaux. L'importance de cette étape n'est pas négligeable parce qu'elle permet de trouver la combinaison optimale des paramètres de validation (force à appliquer sur la machine de test, géométrie du gabarit, points de fixation, etc.) et de réduire le nombre d'itérations au niveau de la validation expérimentale.

L'approche *relative* (voir l'annexe B), utilisée actuellement pour faire la validation expérimentale ne fournit pas une précision satisfaisante en ce qui concerne les résultats des tests effectués. En effet, le châssis existant dont la conception a déjà été prouvée est soumis à un test destructif et les résultats du test sont utilisés pour valider une éventuelle version optimisée du châssis. Or dans le contexte du projet de ROADSTER TRICYCLE1 où les critères liés aux coûts et au poids du véhicule représentent des aspects critiques pour le succès du projet, la validation expérimentale doit être effectuée en concordance avec les chargements réels identifiés précédemment. Conséquemment, la nouvelle approche proposée qui sera définie comme *absolue*, permettra de répliquer d'une manière beaucoup plus précise, les chargements réels de la structure étudiée. De cette manière, les mesures d'optimisation seront prises en fonction du comportement de la structure dans des conditions réelles d'utilisation et pas suite à la comparaison entre le nouveau châssis et le châssis existant qui peut être surdimensionné et qui a été soumis à des essais destructifs sans lien avec les chargements et la durée de vie réelle du véhicule.

Étant donné que deux méthodes différentes ont été identifiées pour effectuer la validation en fatigue du châssis, les deux approches seront appliquées sur un châssis existant, afin d'analyser le comportement de la structure dans les deux cas de cyclage pour ensuite choisir l'approche la plus appropriée pour le châssis du roadster tricycle1.

### MÉTHODE A :

La première étape a donc été d'analyser le montage qui a été conçu pour tester en fatigue le châssis d'un tricycle existant [64]. Dans ce cas, la sollicitation subie par le châssis sera une combinaison de torsion et flexion. Cette approche est illustrée dans la figure 35 qui montre les points de fixation de la structure sur la machine et les points d'application de la force.

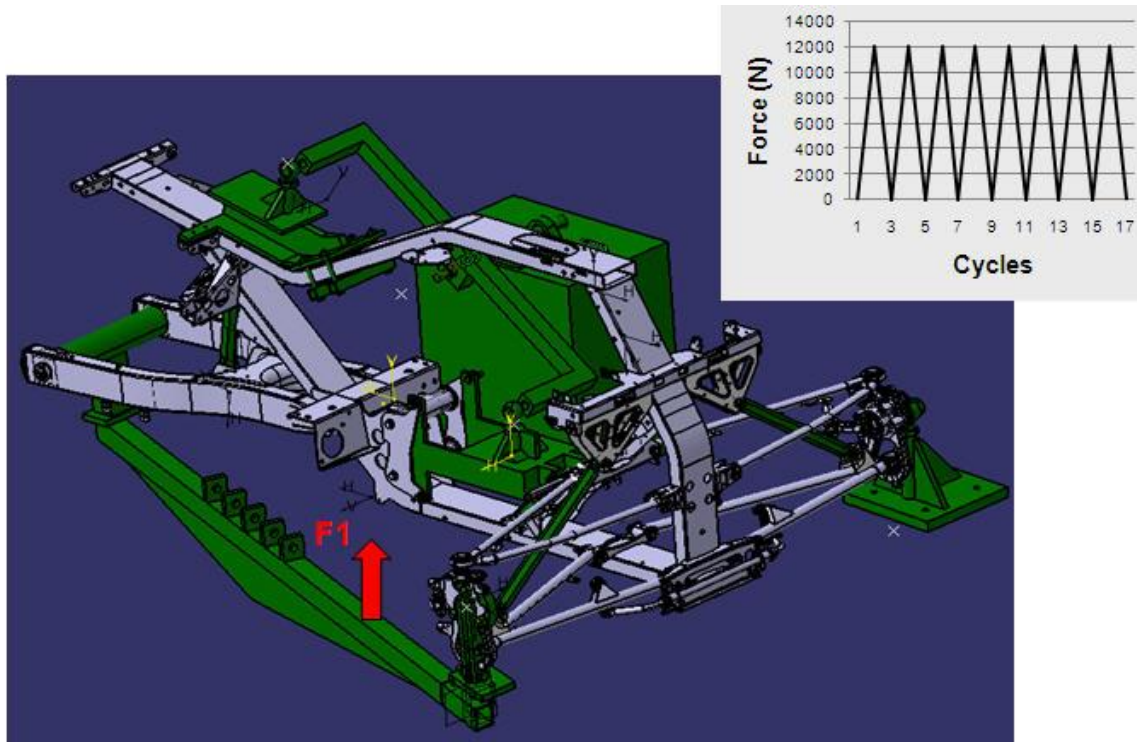
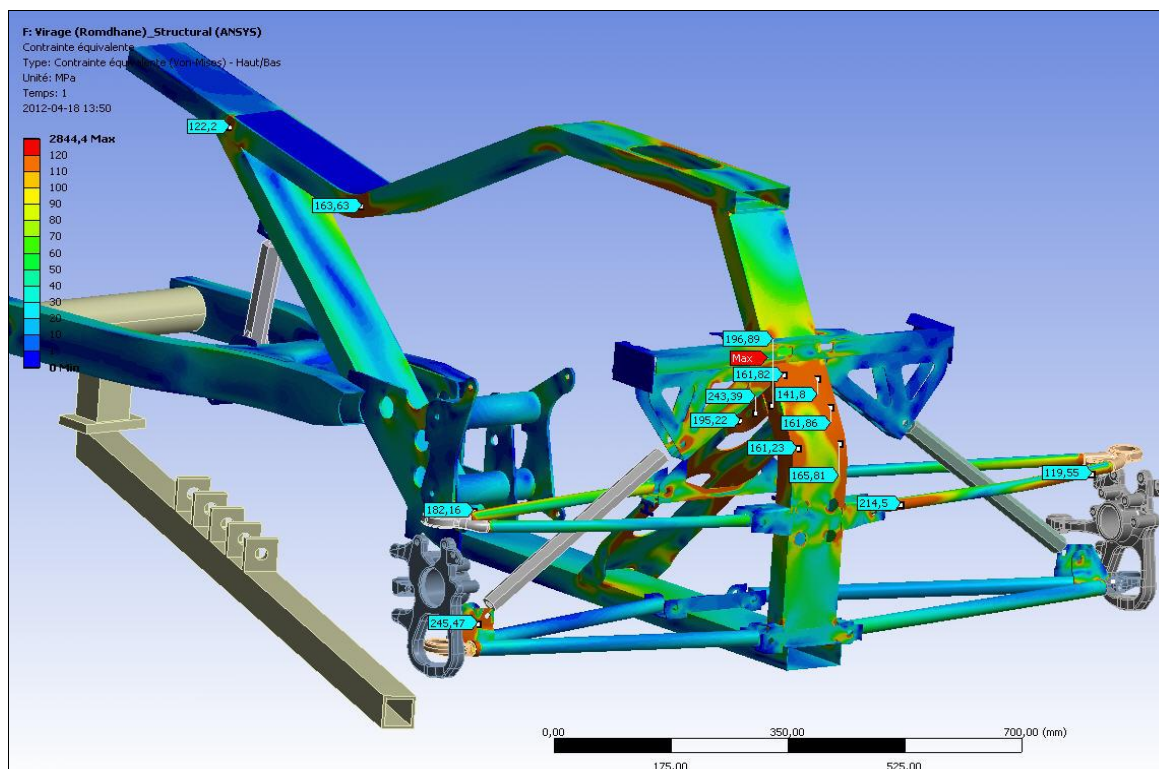


Figure 35: Montage ensemble châssis + gabarit de cyclage pour AEF2 dans l'environnement CATIA

Cette configuration du montage a été effectuée également dans l'environnement ANSYS afin d'analyser les contraintes et les déplacements induits dans la structure par la force du vérin. La force recommandée pour ce type de cyclage est de 12000N [64]. Suite à une simulation par éléments finis (AEF2) pour cette configuration de cyclage, on a identifié une contrainte maximale de 245 MPa à plusieurs endroits de la structure, ce qui équivaut à une durée de vie inférieure à la durée de vie souhaitée de 425000 cycles (voir les figures 34 et 36).

Ainsi, pour obtenir une contrainte maximale admise de 200 MPa, plusieurs itérations ont été effectuées. Ces itérations ont été très utiles pour déterminer la valeur de la force qui sera appliquée sur la machine d'essais pour la durée de vie souhaitée (425000 cycles) pour ce montage soit  $F = 9800 \text{ N}$ .

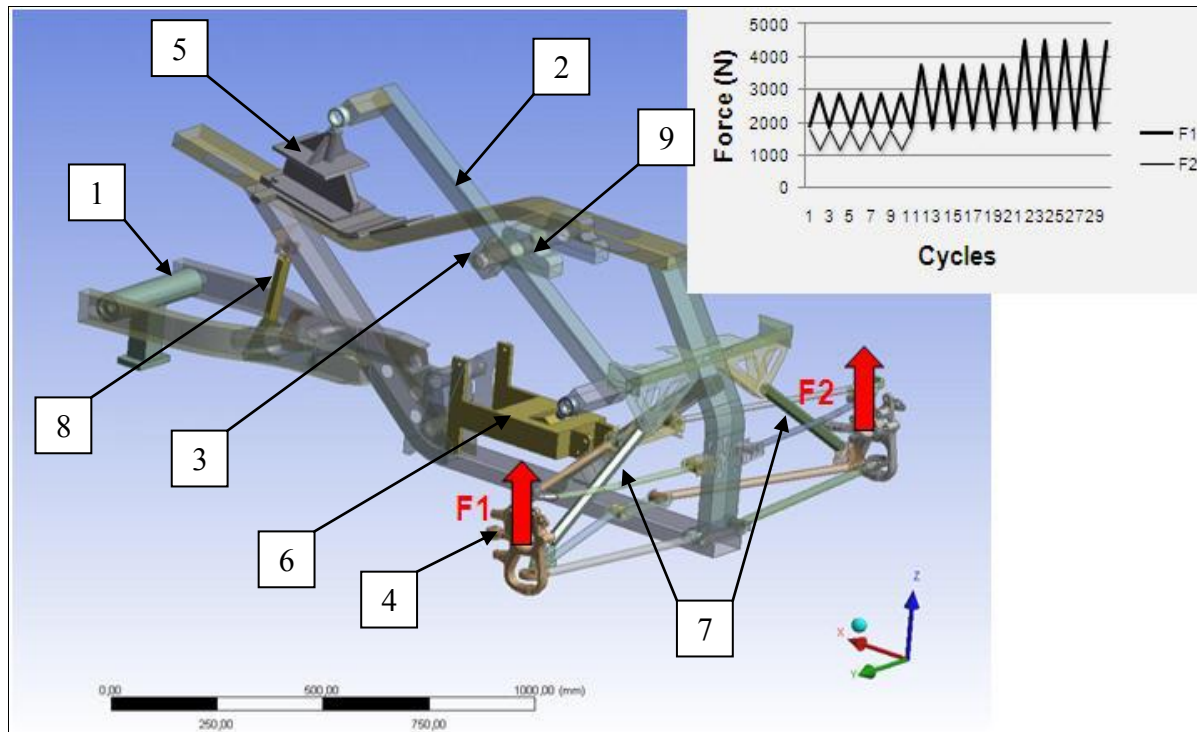


**Figure 36: Simulation numérique du montage dans l'environnement ANSYS**

Le grand désavantage de cette approche est l'impossibilité de répliquer les sollicitations générées par un freinage régulier et un freinage avec dos d'âne. Étant donné que les tests expérimentaux sont effectués pour valider les spécifications du cahier des charges, les sollicitations appliquées sur la machine de tests doivent reproduire les chargements réels établis à l'étape d'identification des chargements (section 4.2.2). Pour y arriver, une deuxième méthode a été proposée pour effectuer le cyclage en fatigue du système châssis :

#### MÉTHODE B :

Cette méthode de cyclage a été proposée suite au besoin identifié précédemment : reproduire la combinaison de sollicitations qui reflète des conditions réalistes d'utilisation du véhicule. En permettant de reproduire les trois types de sollicitations (virage, freinage et freinage + dos d'âne) dans un seul spectre de cyclage, la méthode B répond à ce besoin. La figure 37 montre le principe de cyclage, les points de fixation et les points d'application des forces.



**Figure 37: Maquette numérique du montage sur la machine d'essais MTS, dans l'environnement ANSYS**

Comme la figure 37 la montre, cette méthode nécessite l'utilisation de deux vérins qui seront fixés à chaque roue. Afin de reproduire les sollicitations désirées, les deux vérins travailleront indépendamment et conséquemment la procédure de cyclage sera relativement complexe par rapport à la méthode A.

Voici donc la liste de composants nécessaires à l'instrumentation du châssis sur la machine de traction de la compagnie MTS avec son siège social situé à Eden Prairie, MN/USA (figure 37):

- Sous-ensemble pivot roue arrière (1) ;
- Barre brisée (2) ;
- Arbre de retenue (3);
- Sous-ensemble vérin-moyeu (4) ;
- Support siège (5) ;
- Support moteur (6) ;
- Suspension avant (7) ;
- Suspension arrière (8) ;
- Paliers + roulements (9).



Un premier point de fixation du montage sur la machine d'essais sera prévu au niveau de la roue arrière par le sous-ensemble pivot-roue arrière (1). La structure aura donc un seul degré de liberté, soit une rotation autour de l'axe de la roue.

Un deuxième point de fixation du montage sur la machine sera réalisé par une liaison pivot au niveau du centre de masse du véhicule (3) et (9). Pour avoir une meilleure distribution de forces dans la structure et pour répliquer le plus fidèlement possible les conditions réelles d'utilisation, la barre brisée sera fixée aux centres de masse du siège et du moteur par des joints de type rotule et elle pivotera autour du barycentre du véhicule.

Les itérations effectuées à l'étape AÉF2 ont servi à vérifier que les contraintes dues aux forces appliquées sur la machine correspondent bien à celles induites par les chargements réels (AÉF1). Les figures 38, 39 et 40 présentent la distribution des contraintes à la suite des simulations (AÉF2) effectuées pour chaque type de sollicitation, soit virage (flexion+torsion), freinage (flexion pure) et freinage avec dos d'âne (flexion pure). La corrélation entre les étapes de simulation par éléments finis est illustrée par les figures 91 et 92 qui montre très bien la correspondance entre les zones sollicitées suite aux chargements réels et celles sollicitées suite aux chargements appliqués sur la machine de test.

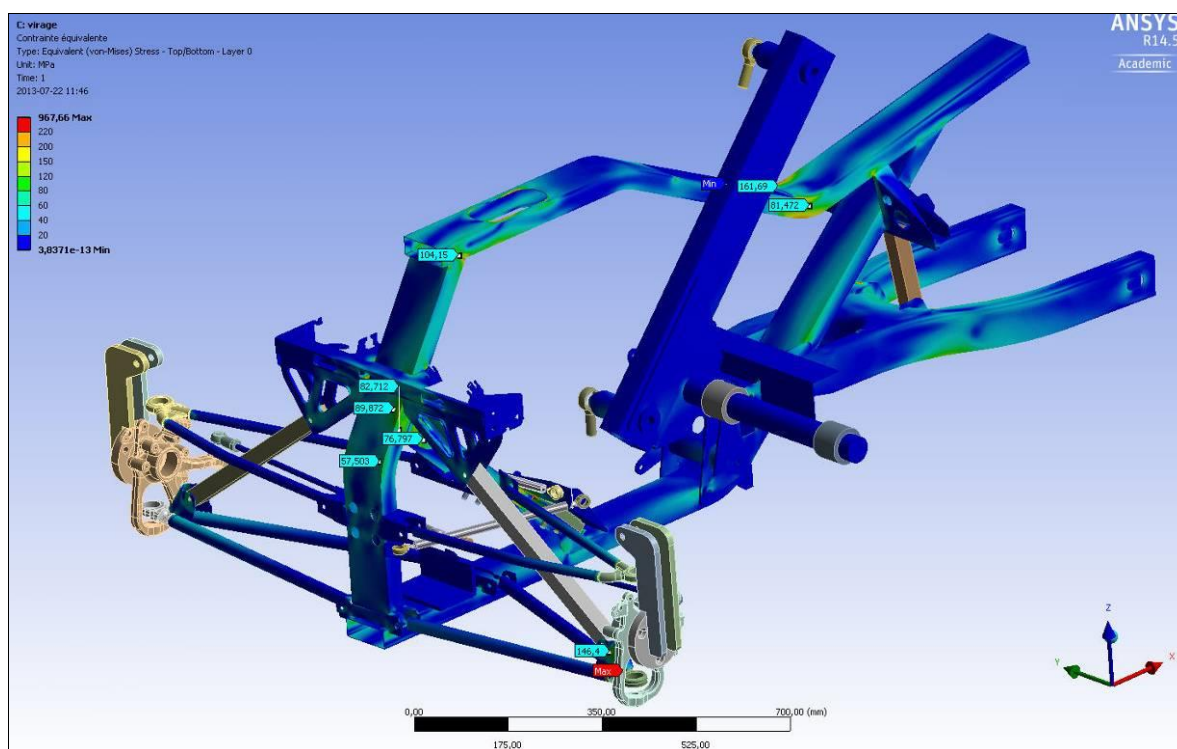


Figure 38: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné asymétrique (virage)

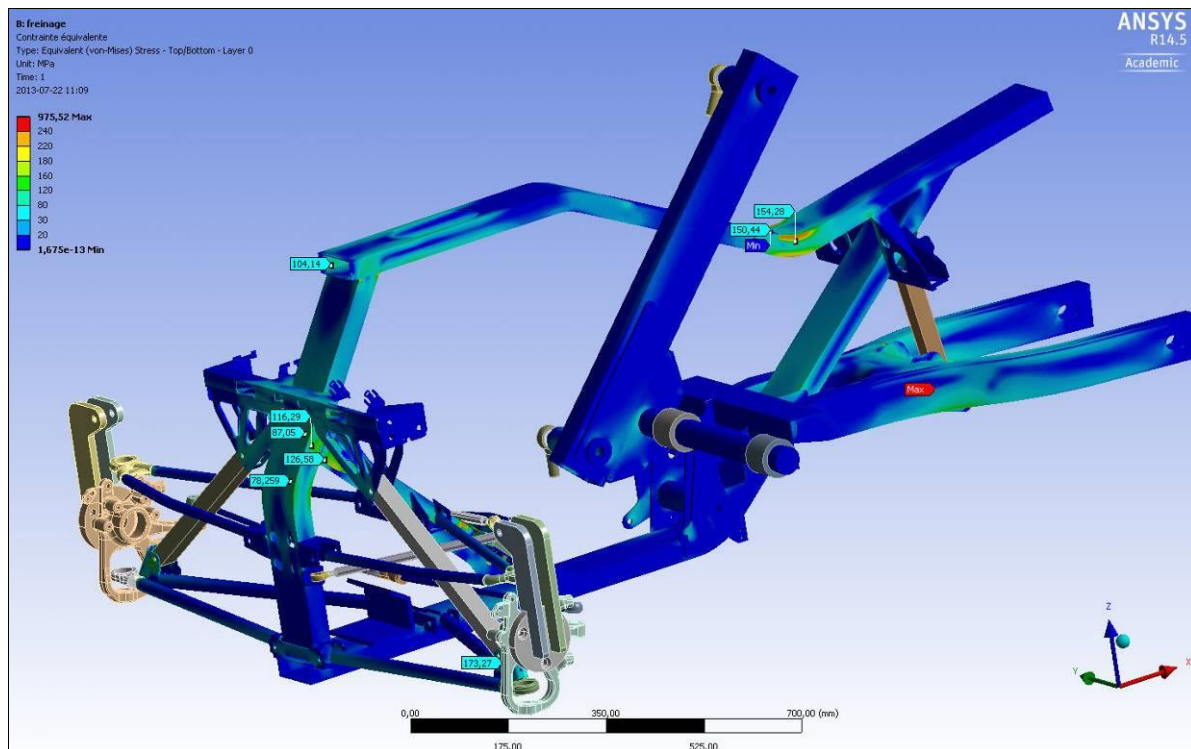


Figure 39: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné symétrique (freinage)

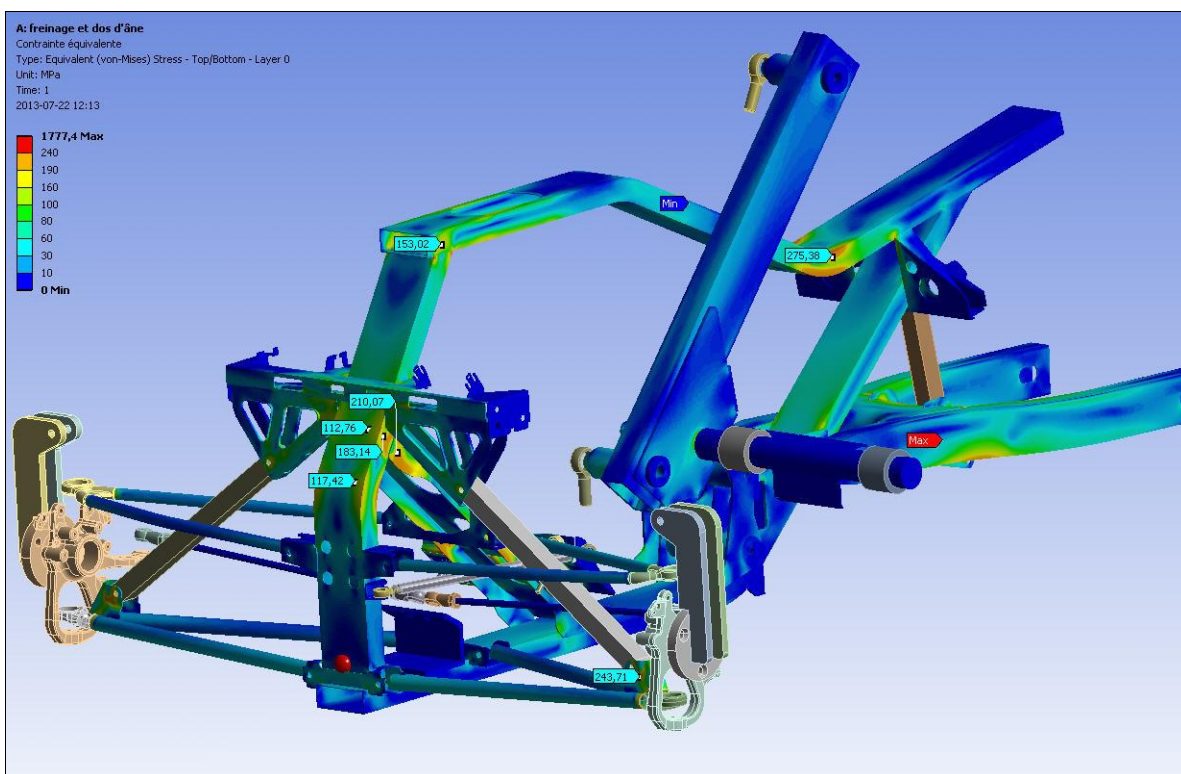


Figure 40: Simulation par éléments finis (AÉF2) d'un cyclage alterné symétrique (freinage+dos d'âne)

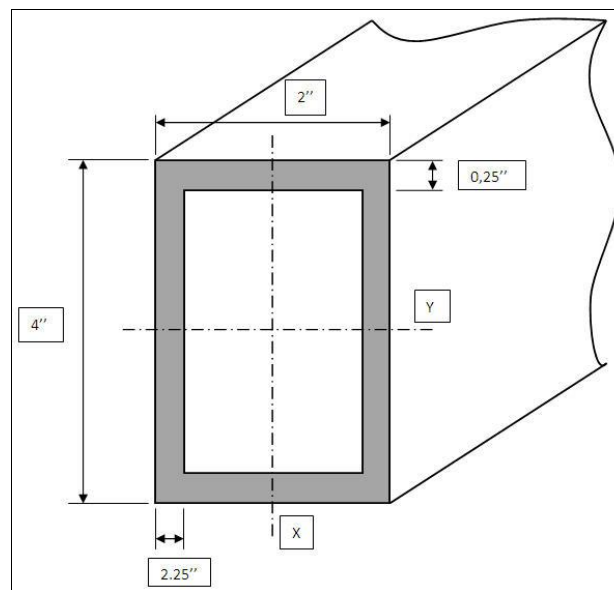


À la suite des calculs numériques effectués pour chaque type de sollicitation, le tableau 11 présente les forces à appliquer par la machine pour la durée de vie souhaitée et pour les tests accélérés :

**Tableau 11: Forces appliquées par la machine de traction en fonction du type d'essai**

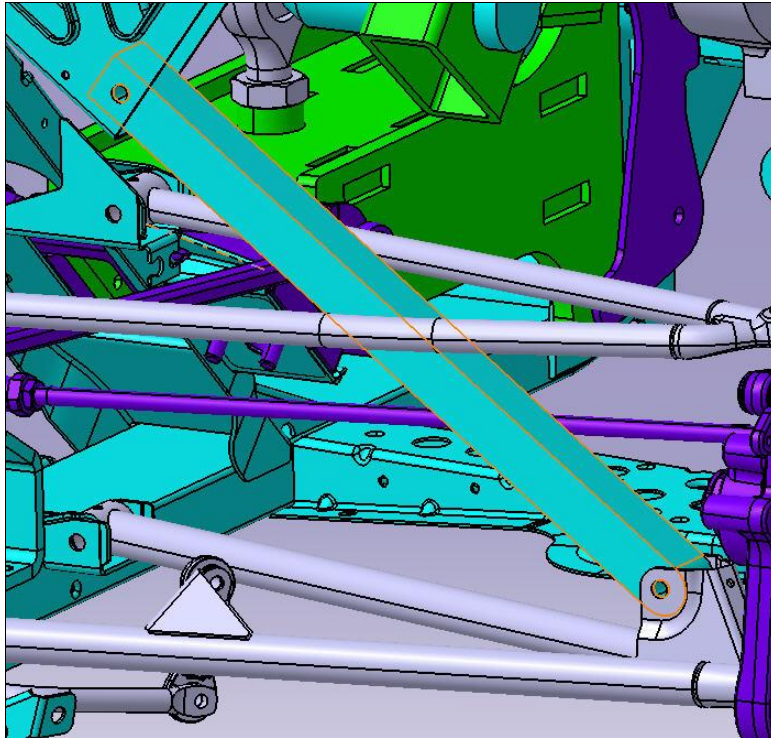
| Type de sollicitation | Tests destructifs<br>(10000cycles) |                                 | Tests accélérés                 |                                 | Durée de vie estimée<br>(425000cycles) |                                 |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
|                       | $F_{\text{gauche}} \text{ (N)}$    | $F_{\text{droite}} \text{ (N)}$ | $F_{\text{gauche}} \text{ (N)}$ | $F_{\text{droite}} \text{ (N)}$ | $F_{\text{gauche}} \text{ (N)}$        | $F_{\text{droite}} \text{ (N)}$ |
| <b>Virage</b>         | 9600                               | 3100                            | 7500<br>5000                    | 2800<br>1800                    | 4000                                   | 1500                            |
| <b>Freinage</b>       | -                                  | -                               | 5000                            | 5000                            | 4000                                   | 4000                            |

La déflexion de la barre brisée a été calculée par éléments finis pour plusieurs sections candidates. Le profilé de la barre brisée présentant le minimum de déflexion a été retenu. Il s'agit d'un tube rectangulaire 2''/4'' avec une épaisseur de 0,25'' (figure 41).

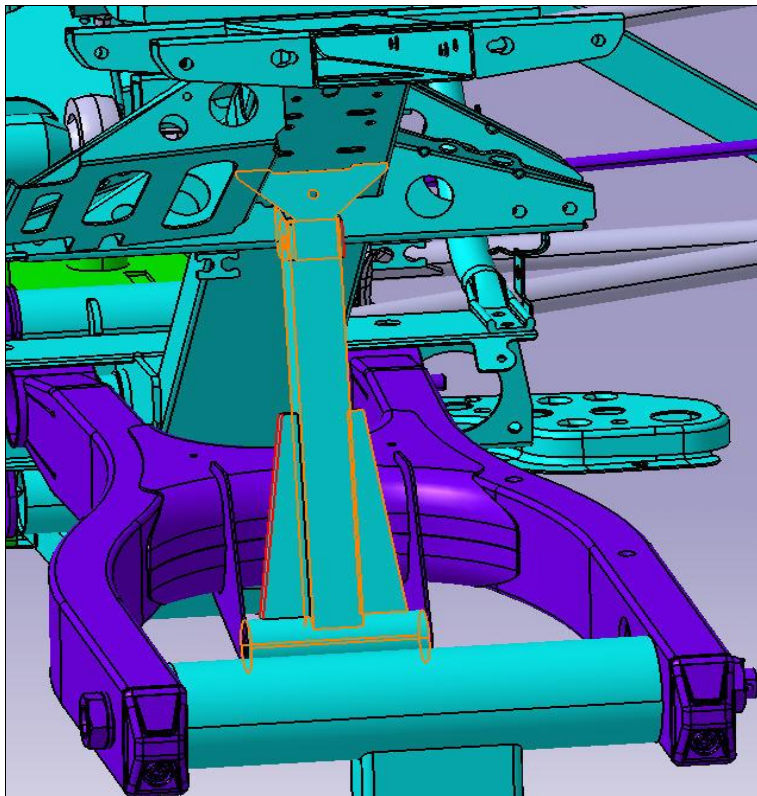


**Figure 41: Profilé rectangulaire choisi pour la barre brisée**

La rigidité de la structure au niveau du sous-système de suspension avant est assurée en remplaçant les amortisseurs par des barres rigides liées aux attaches amortisseurs par des joints de type pivot (figure 42). L'amortisseur arrière sera également remplacé par une barre rigide, renforcée par des raidisseurs et soudée à 90 degrés sur une barre horizontale (figure 43).



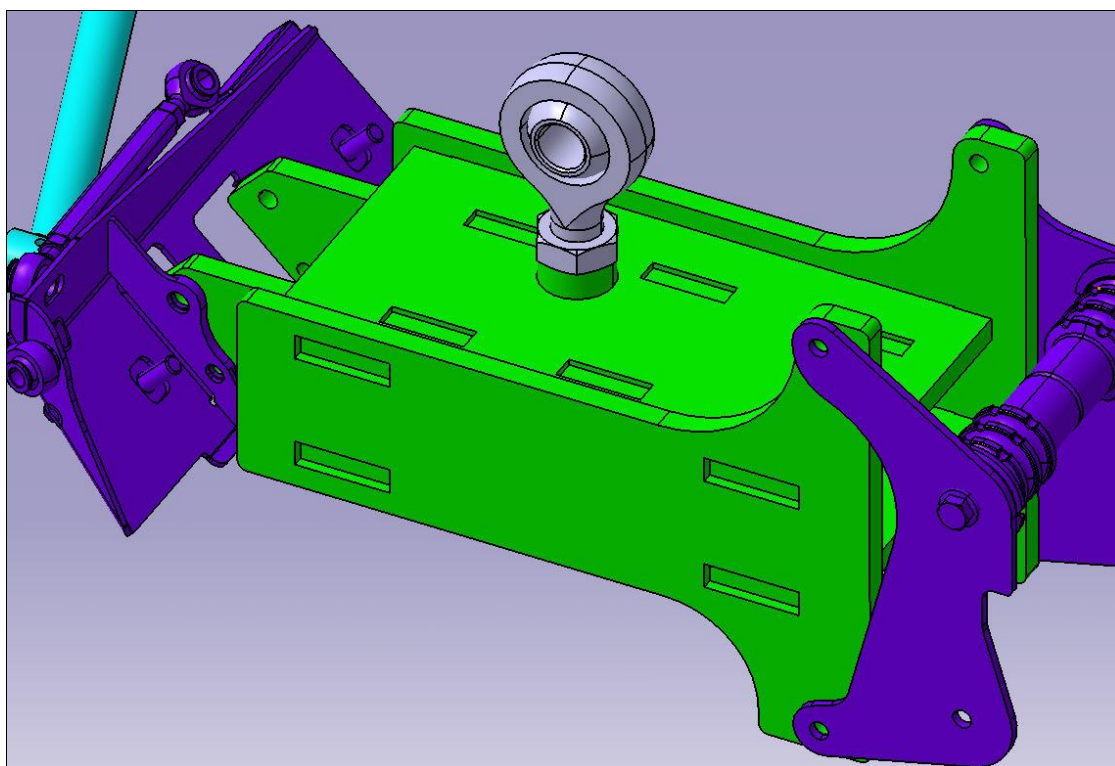
**Figure 42: Fixation de la barre rigide entre les triangles supérieur et inférieur du sous-système suspension avant**



**Figure 43: Fixation de la barre rigide entre le bras de suspension arrière et la poutre inférieure du châssis**

Comme il a été précisé précédemment, les barycentres du moteur et du siège ( $CG_{pa}$  et  $CG_m$ ) seront liés à la barre brisée par des joints de type rotule. À son tour, la barre brisée va pivoter autour de l'axe du barycentre du véhicule ( $CG_v$ ).

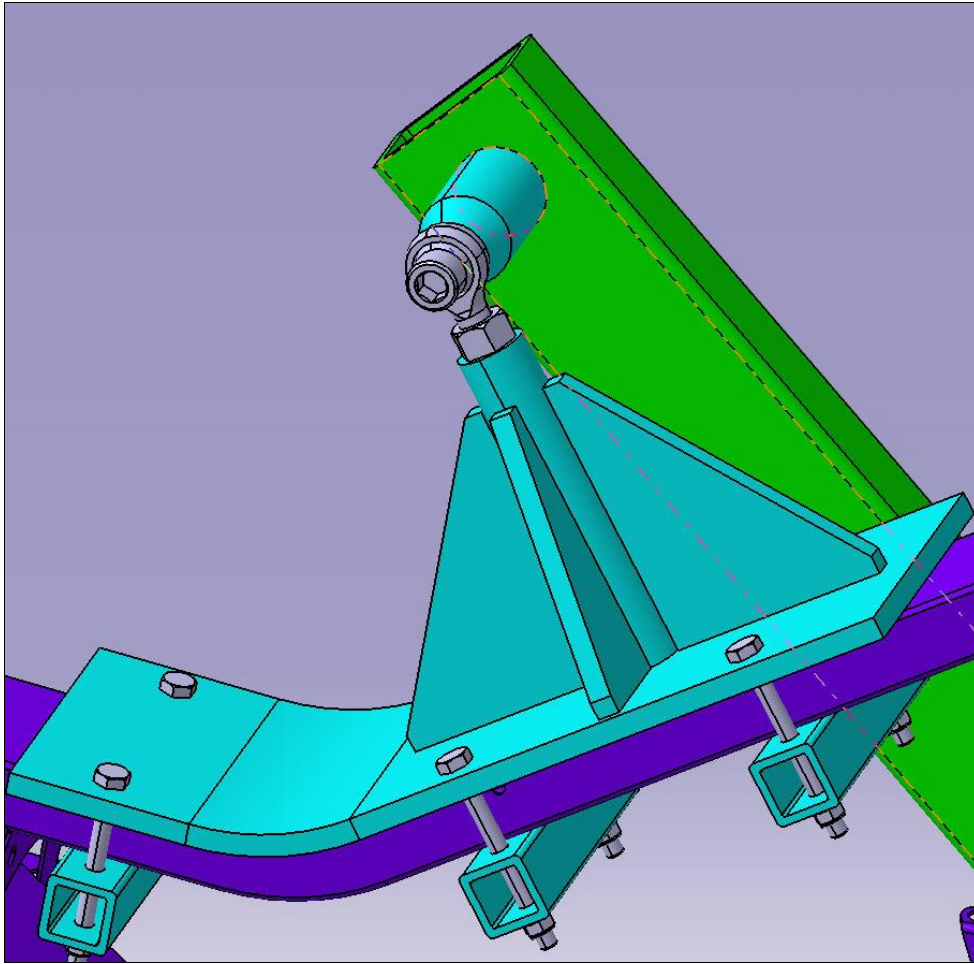
La structure dédiée au moteur a été conçue à partir de plusieurs plaques imbriquées et soudées (voir la figure 44) afin d'assurer une bonne rigidité, une bonne résistance mécanique et en même temps afin de ne pas alourdir le montage.



**Figure 44: Système d'attache moteur**

Dans la simulation par éléments finis (AÉF\_2), toutes les pièces d'attache du moteur ont été incluses afin de reproduire le mieux possible la distribution réelle des forces dans le système châssis.

Dans le système d'attache siège (figure 45), le joint de type rotule va faire la liaison entre le barycentre du conducteur et la barre brisée. Des renforts supplémentaires ont été ajoutés autour de la pièce cylindrique afin d'assurer la rigidité du système. Toujours pour assurer la rigidité du montage, l'assemblage du système d'attache siège sur le châssis sera effectué par six boulons M12 au travers de trois tubes carrés.



**Figure 45: Système d'attache siège**

Dans le tableau 12 se trouvent les valeurs de contraintes et de déplacements dans les zones les plus sollicitées de la structure. Ces valeurs seront comparées aux données obtenues à la suite des essais expérimentaux afin de valider les calculs numériques. Tous les points de contrôle sont illustrés dans l'annexe C, pour tous les cas de sollicitations (freinage et dos d'âne, freinage, virage). Après plusieurs itérations effectuées à l'étape AÉF2, il a été possible de déterminer les forces qui induisaient des valeurs de contraintes comparables à celles enregistrées à l'étape AÉF1. Le tableau 12 centralise les résultats de cette étape de simulations pour la durée de vie souhaitée de la structure.

**Tableau 12: Contraintes et déplacements induits par les forces appliquées par la machine d'essais (résultats obtenus suite aux simulations par ÉF pour la durée de vie souhaitée : 425000 cycles)**

| <b>Résultats du calcul numérique de la <math>\sigma</math> équiv. (AÉF2)</b> |                                  |                                 |                                  |                                 |                                 |                                 |
|--|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Point de contrôle</b>   | <b>Virage</b>                    |                                 | <b>Freinage</b>                  |                                 | <b>Forces appliquées</b>        |                                 |
|  | <b><math>\sigma</math> (MPa)</b> | <b><math>\delta</math> (mm)</b> | <b><math>\sigma</math> (MPa)</b> | <b><math>\delta</math> (mm)</b> | <b>Virage</b>                   | <b>Freinage</b>                 |
| <b>P1</b>  | 89                               | 2,2                             | 86                               | 2                               | Fg=1500 N<br>Fd=3540 N<br>Ra=NA | Fg=3540 N<br>Fd=3540 N<br>Ra=NA |
| <b>P2</b>  | 57                               | 1,5                             | 78                               | 1,2                             |                                 |                                 |
| <b>P3</b>  | 77                               | 2,4                             | 126                              | 2,1                             |                                 |                                 |
| <b>P4</b>  | 82                               | 2,6                             | 116                              | 2                               |                                 |                                 |
| <b>P5</b>  | 147                              | 2,6                             | 174                              | 2,3                             |                                 |                                 |
| <b>P6</b>  | 104                              | 2,4                             | 104                              | 2                               |                                 |                                 |
| <b>P7</b>  | 81                               | 2,5                             | 155                              | 1,5                             |                                 |                                 |
| <b>P8</b>  | 162                              | 2,8                             | 150                              | 1,5                             |                                 |                                 |

Dans le contexte présent de globalisation des marchés, la concurrence est inévitable et les réductions de coûts et de temps de développement seront toujours requises par les clients. Une opportunité de répondre à ce besoin sera d'intégrer les tests accélérés dans le PDP du véhicule récréatif à trois roues. Pour ce faire, plusieurs tests seront effectués pour un nombre réduit de cycles afin de valider l'approche et de raffiner dans le cas échéant la courbe S-N du matériau. Les forces des vérins seront donc augmentées jusqu'à la valeur où ces derniers vont induire dans la structure une contrainte maximale de 360 MPa (valeur estimée de la contrainte de rupture pour le test accéléré de 10000 cycles: voir la figure 34). Ainsi, le tableau 13 regroupe les résultats des simulations par éléments finis du cyclage pour les tests accélérés.

**Tableau 13: Contraintes et déplacements induits par les forces appliquées sur la machine d'essais (résultats obtenus suite aux simulations par ÉF pour les tests accélérés : 10000 cycles)**

| Point de contrôle | Symétrique (freinage) |               | Asymétrique (virage) |        |
|-------------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------|
|                   | $\sigma$ (MPa)        | $\delta$ (mm) | $\sigma$ (MPa)       | d (mm) |
| <b>P1</b>         | 275                   | 6,6           | 232                  | 7,9    |
| <b>P2</b>         | 313                   | 6,5           | 184                  | 3,2    |
| <b>P3</b>         | 213                   | 6,8           | 201                  | 5,4    |
| <b>P4</b>         | 219                   | 6,5           | 245                  | 3,8    |
| <b>P5</b>         | 216                   | 7             | 114                  | 4,9    |
| <b>P6</b>         | 246                   | 6,7           | 210                  | 11,5   |
| <b>P7</b>         | 174                   | 2,9           | 226                  | 1      |
| <b>P8</b>         | 253                   | 6,5           | 355                  | 6      |

Si on compare les résultats des étapes de simulations par éléments finis (les tableaux 10 et 12), on voit très bien que les niveaux de contraintes suite à l'analyse AÉF1 sont inférieurs à ceux enregistrés à l'étape AÉF2. Et c'est exactement ce qu'on cherche: on voulait donc que l'essai expérimental soit un peu plus sévère par rapport aux valeurs des chargements réels, afin de s'assurer que la durée de vie de la structure ne soit pas surévaluée.

En augmentant d'une manière contrôlée les valeurs des contraintes à la phase d'essais expérimentaux, on reste suffisamment préventifs en ce qui concerne les contraintes résiduelles, induites par la variation de la température. Conséquemment, ce type de contraintes dues à la variation de la température et qui pourraient influencer le comportement de la structure en fatigue a donc été pris en compte à l'étape de validation numérique AÉF2.

#### 4.2.5. Validation expérimentale

Après avoir effectué plusieurs itérations à l'étape de validation numérique (AÉF2) où le cyclage du châssis a été simulé sur la machine d'essais, on a procédé à la fixation et à l'instrumentation du système châssis sur la table de la machine.



La fixation de la structure a été effectuée à l'aide du gabarit conçu à cet effet et qui a été détaillé à la section précédente. Les forces qui seront appliquées aux vérins dépendent du type de test que l'on souhaite. La méthode de validation développée nous permet d'effectuer des tests complets (425000 cycles) et des tests accélérés (10000 cycles).

Dans une première étape, nous avons identifié les zones les plus sollicitées du châssis et la manière la plus appropriée d'installer des jauges de déformation (orientation, position, nettoyage de surfaces, protection des jauges, etc.). Les outils informatiques utilisés à l'étape d'instrumentation du châssis sur la machine de traction sont les mêmes que ceux qui ont été mentionnés à la section 4.2.1.1. (Identification des chargements), soit les logiciels TCE\_v3.15 et EASE 3.

Le système d'acquisition des données e-DAQ avec ses 28 canaux (24 branchés aux jauges et 4 branchés au système de commande de la machine de traction figure 46) a été utilisé afin d'identifier les contraintes dans les zones concernées.

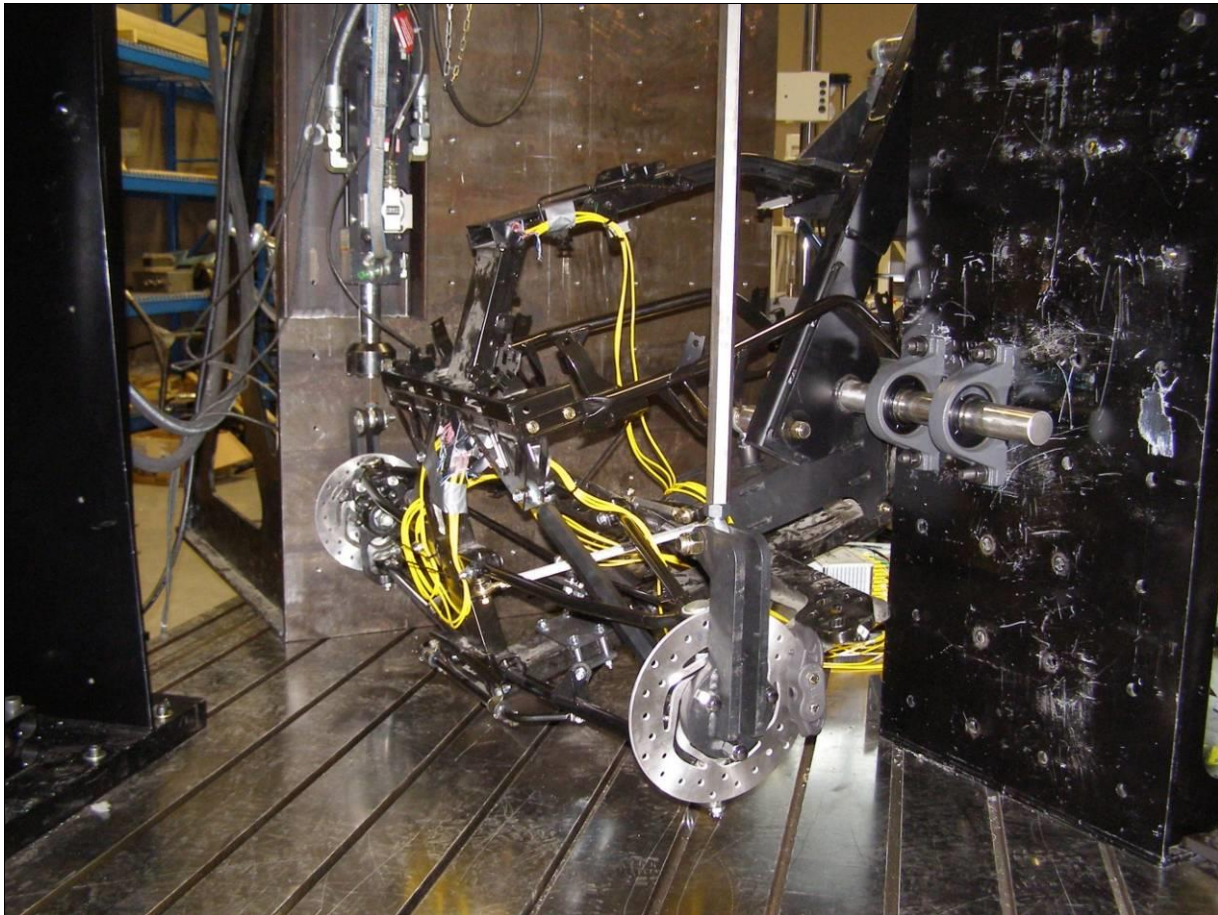


**Figure 46: Calibration des jauges de contraintes installées aux points de mesure**

Les quatre canaux supplémentaires ont été réservés au système d'acquisition de données afin d'enregistrer les valeurs des forces appliquées par la machine de tests et les déplacements des

vérins. En effet, le système de commande de la machine de traction a été branché au système e-DAQ et les valeurs des déformations, des déplacements et des forces ont été enregistrées en même temps dans le même fichier d'acquisition de données.

La structure a été fixée sur la machine de tests à un angle de  $25^\circ$  (figure 47) afin de répliquer l'angle de la plongée du véhicule lors d'un freinage. Cet angle a été calculé dans l'environnement ANSYS, en fonction des forces générées par les accélérations sur les axes X et Z (voir le tableau 7).



**Figure 47: Fixation de la structure sur la machine de traction MTS à l'angle de  $25^\circ$**

Avant de commencer le test, il a fallu s'assurer que les forces appliquées sur la machine induisaient dans la structure les mêmes contraintes que celles simulées à l'étape AÉF2. À cet effet, une calibration des rosettes a été nécessaire, suivie d'une vérification des contraintes dans les points de référence. Le calcul de la contrainte équivalente complètement renversée a été effectué (comme à l'étape d'identification des chargements 4.2.2.) en utilisant les formules de Hooke (*pour déterminer la déformation interne*), les formules de von Mises (*pour*



déterminer la contrainte équivalente) et la formule de Goodman (pour déterminer la contrainte équivalente complètement renversée). Le calcul de la contrainte équivalente complètement renversée est nécessaire pour prédire la durée de vie de la structure en utilisant la courbe S-N. Étant donné que les courbes S-N sont déterminées suite aux sollicitations alternées (traction-compression) appliquées sur des éprouvettes de dimension standard, la formule de Goodman a été l'outil employé pour le calcul d'une contrainte ( $\sigma_{\text{eq-CR}}$ ) qui produit la défaillance de la même manière que la contrainte axiale complètement renversée.

Comme nous l'avons prédit, les résultats du test expérimental et l'application de la loi de Miner (figure 48), nous ont montré que la durée de vie du châssis de référence est plus de deux fois plus grande que la durée de vie souhaitée et donc, le système châssis du véhicule est surdimensionné.

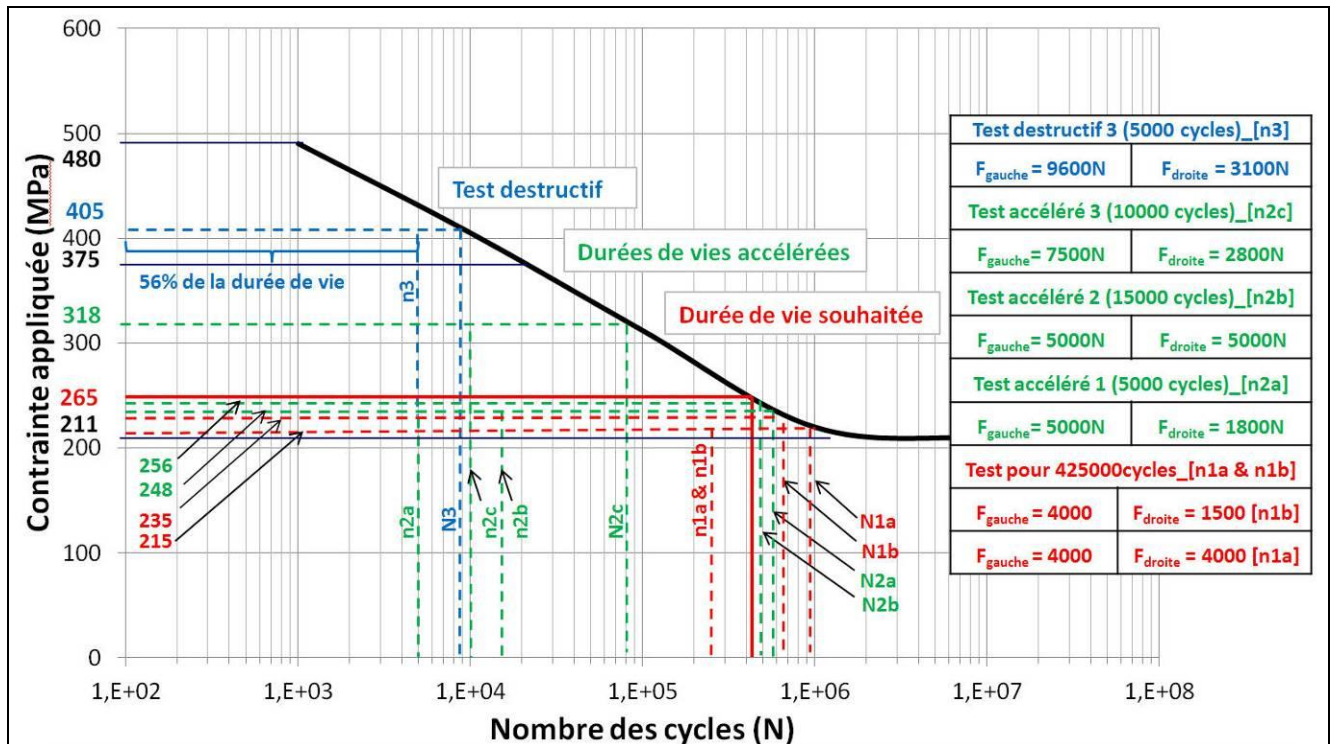


Figure 48: La courbe S-N optimisée et l'application de la loi de Miner

Conformément à la loi de Miner, pour que la rupture survienne, la condition ci-dessous doit être satisfaite :

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_k} \geq 1$$

Dans le cas du châssis de référence, l'application de cette approche démontre donc, la robustesse excessive de la structure :

$$\frac{n1a}{N1a} + \frac{n1b}{N1b} + \frac{n2a}{N2a} + \frac{n2b}{N2b} + \frac{n2c}{N2c} + \frac{n3}{N3} \geq 1$$

$$\frac{212500}{950000} + \frac{212500}{650000} + \frac{5000}{550000} + \frac{15000}{450000} + \frac{10000}{80000} + \frac{5000}{8800} =$$

$$= 0,2236 + 0,3269 + 0,0091 + 0,033 + 0,125 + 0,56 = 1,277$$

Les premiers deux blocs de cycles qu'on aperçoit dans la relation ci-dessus représentent la durée de vie souhaitée de l'ensemble châssis. Le troisième, le quatrième et le cinquième bloc représentent des tests accélérés, effectués sur la même structure après le cyclage pour la durée de vie souhaitée (425000 cycles). Enfin, le dernier bloc de cycles représente le test destructif appliqué sur la structure afin de déterminer les points le plus affectés de cette dernière.

Grâce à l'application de la loi de Miner on est en mesure d'estimer la vie consommée du châssis, après chaque bloc (spectre) de chargements. On aperçoit donc qu'après le cyclage pour la durée de vie souhaitée (avec 235 MPa pour simuler un virage et 215 MPa pour le freinage), la vie consommée de la structure était d'environ 55 % et après les tests accélérés à 405 MPa, la vie consommée était d'environ 71 %. Mais pour une combinaison optimale de paramètres de conception (géométrie/matériau), le pourcentage de la vie consommée après 425000 cycles (qui représente la durée de vie souhaitée) à 265 MPa devrait être d'environ 100%. Avant le test destructif, il restait donc environ 29 % de la durée de vie totale du châssis. Par contre, la figure 48 montre que la défaillance (rupture) est apparue après 56 % de la durée de vie estimée pour le test destructif à 405 MPa et conséquemment, la durée de vie de la structure dépasse très largement le nombre de cycles souhaité.

Il faut mentionner également que le rapport de charge  $\left(R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}\right)$  a eu une influence positive sur la durée de vie de la structure étudiée. Dans le cas du châssis de référence, ce rapport est situé entre 0,4 et 0,5. Par exemple, durant le test de 425000 cycles, au point de mesure P8 la valeur de la contrainte équivalente variait de 106 MPa à 210 MPa, donc un rapport de charge de 0,5. La figure 49 montre l'effet du rapport de charge sur la durée de vie d'une structure d'aluminium. Étant donné la complexité de la structure et la variété des types de contraintes qui agissent sur cette dernière (traction, compression et cisaillement), la valeur du rapport de charge a été considérée comme négative [60]. Comme la figure 49 le montre, l'influence d'un rapport de charge négatif est moindre que celle pour une valeur positive ce qui nous permet de rester plus prudents en ce qui concerne l'effet positif de ce facteur [60].

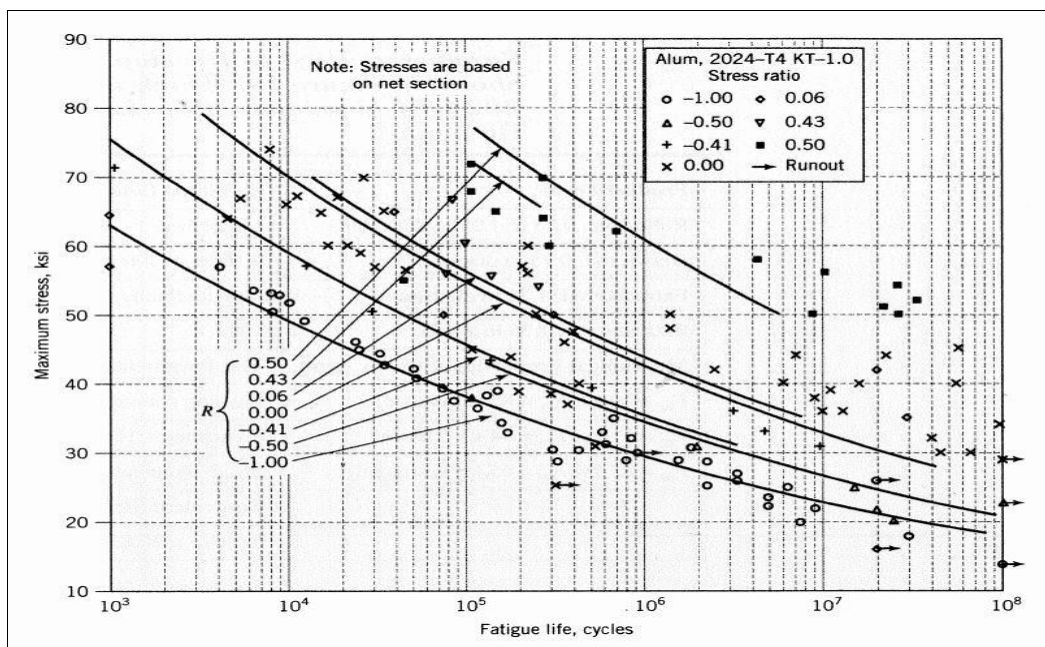


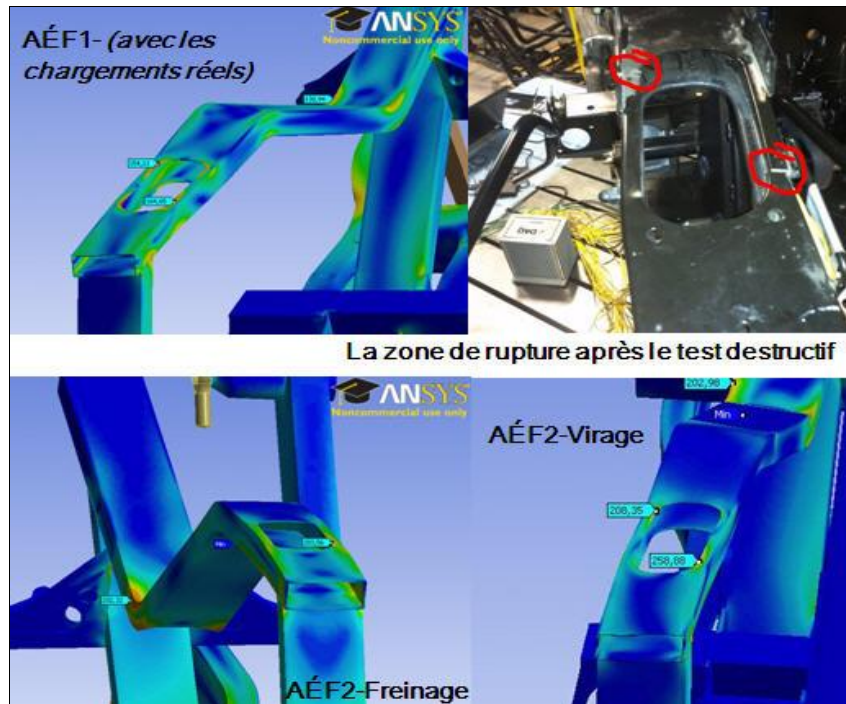
Figure 49: Les courbes S-N en fonction des rapports de charges pour l'Al 2024-T4 [60]

Finalement, le résultat de l'application des chargements réels sur la structure est qu'après 425000 cycles, la structure était intacte et donc fonctionnelle. La rupture est arrivée après le test destructif dans la zone découpée de la poutre supérieure, zone qui est très proche du point P6 (voir la figure 50).



Figure 50: Zone de rupture

La valeur de la contrainte dans la zone de rupture était approximativement égale à celle du point P8 à l'étape de la simulation AÉF2. La rupture est survenue dans cette zone parce que dans la réalité, sur la paroi latérale de la poutre supérieure, il y a un découpage qui affaiblit davantage les arrêtes de la zone coupée et qui n'a pas été inclus dans les simulations (figure 51). En plus, la concentration de contraintes autour des arrêtes vifs du découpage accroît la probabilité d'initiation d'une fissure.



**Figure 51: Comparaison de la zone de rupture avec les étapes AÉF1 et AÉF2**

Un aspect très important à retenir est que la structure a cédé après plusieurs spectres de chargements qui dépassent largement les forces réelles qui agissent sur la structure dans des conditions normales d'utilisation. Ainsi, durant le dernier bloc de cyclage, la structure a été soumise uniquement à une sollicitation de torsion+flexion avec une force  $F1 = 9,6 \text{ KN}$  et  $F2 = 2,8 \text{ KN}$ . À une telle sollicitation de torsion, la structure était compromise du point de vue fonctionnel même si elle ne présentait aucun bris. En effet, la déformation plastique est alors devenue le mode de défaillance de la structure.

Après l'étape de validation expérimentale, même si l'étude a été effectuée seulement sur un prototype, l'approche de validation proposée nous a permis d'établir la durée de vie réelle du châssis de référence et de faire quelques recommandations afin d'optimiser la conception des

nouveaux concepts. Ainsi, le facteur de sécurité pour le châssis optimisé sera réduit de 2,2 à 1,4 par rapport à la limite élastique du matériau choisi pour la fabrication. La nouvelle valeur de 1,4 pour le facteur de sécurité a été calculée en divisant la valeur de la limite élastique du matériau (375 MPa) par la valeur de la contrainte maximale admise pour la durée de vie souhaitée (265 MPa); voir la figure 48.

**Tableau 14: Facteurs de sécurité utilisés pour la conception du châssis**

|                             | <b>Châssis de référence</b>                 | <b>Châssis Acier 2D<br/>Optimisé</b>        | <b>Châssis Alu 2D</b>  |
|-----------------------------|---|---|--|
| <b>Masse</b>                | <b>32.6 kg</b>                              | <b>28.5 kg</b>                              | <b>12 kg</b>   |
| <b>Facteurs de sécurité</b> | <b>2.17</b> ( $Sé/\sigma_{max} = 375/170$ ) | <b>1.41</b> ( $Sé/\sigma_{max} = 375/265$ ) | <b>1.41</b> ( $Sé/\sigma_{max} = 275/195$ )<br><b>2.21</b> ( $Sé/\sigma_{max} = 275/124$ ) |

Dans la deuxième colonne du tableau 14, on aperçoit le facteur de sécurité qui a été utilisé pour la conception du châssis existant. Les résultats des tests expérimentaux effectués sur le châssis de référence ont démontré que ce dernier est beaucoup trop robuste par rapport aux conditions d'utilisation auxquelles il sera soumis. Comme mentionné ci-dessus, le facteur de sécurité proposé pour la conception d'un nouveau châssis sera de 1,4. Par contre, si le matériau choisi est l'aluminium, on aura deux facteurs de sécurité : un facteur de sécurité de 2,2 utilisé pour la conception des joints s'ils sont soudés et un deuxième facteur de sécurité de 1,4 utilisé dans les zones qui ne sont pas soumises à des températures élevées, occasionnées par la soudure (tableau 14). On garde donc, le facteur de sécurité de 2,2 dans les zones affectées thermiquement (ZAT) parce qu'il n'y a pas encore de tests effectués avec les chargements identifiés précédemment sur les joints soudés en aluminium. Des tests en fatigue sur ce type de joints font partie du projet de recherche de William Rougé (étudiant à la maîtrise en génie mécanique et membre de l'équipe APC au CTA) dans la perspective d'analyser la possibilité de réduire le facteur de sécurité dans les ZAT de la structure.

Enfin, l'étape de validation en laboratoire nous a permis de déterminer d'une manière expérimentale la durée de vie et la robustesse du châssis de référence. La méthode utilisée nous a permis de répliquer sur la machine d'essais, les cas de chargements usuels rencontrés couramment dans la durée de vie du véhicule et d'optimiser le facteur de sécurité du châssis suite aux résultats du test qui ont démontré que la structure est surdimensionnée.



#### 4.2.6. Validation physique

La validation physique s'effectuera selon le processus global de développement des nouveaux produits (NPD) qui est appliqué actuellement dans l'industrie de produits récréatifs (figure 52). Donc, au début de la phase de production, quand le processus de fabrication et d'assemblage sera mis au point, les tests physiques pourront être effectués. Les tests physiques sont très dispendieux parce que ceux-ci sont effectués sur de nouveaux véhicules assemblés sur la chaîne de production.

Conséquemment, les tests physiques devraient inclure une analyse détaillée de plusieurs critères de validation :

- la durée de vie de la batterie et du système électrique du véhicule ;
- la durée de vie en nombre des cycles et le comportement du système structural du véhicule ;
- la tenue du véhicule dans des conditions réelles d'opération (vibrations, aérodynamique, refroidissement, etc.)



Figure 52: Processus global de développement des nouveaux véhicules récréatifs [28]

En ce qui concerne le système structural du véhicule (*châssis, bras de suspension avant et arrière, bras de direction, etc.*), des trajets qui incluent les types de chargement testés expérimentalement pourraient être établis dans le but de faire une analyse et une rétroaction sur les étapes de conception et validation numériques (AÉF1 et AÉF2).

Les tests physiques permettront également de faire une évaluation de la sévérité des tests expérimentaux.

Par exemple, le fait que les amortisseurs soient remplacés par des barres rigides rend le test expérimental plus sévère par rapport aux cas réels d'utilisation où l'ensemble amortisseur-ressort absorbe une partie des forces appliquées dans les moyeux des roues.

En revanche, dans des conditions réelles d'utilisation du véhicule, les variations des chargements sont potentiellement plus importantes que celles des essais expérimentaux où les paramètres du test (*fréquence, déplacements, forces*) sont relativement uniformes.

Il y a également plusieurs facteurs hors du contrôle du fabricant qui influent la durée de vie du véhicule. En voici quelques-uns :

- l'état des routes ;
- la manière de conduite ;
- les conditions environnementales d'utilisation.

Les tests physiques seront donc effectués en conformité avec les spectres de chargements identifiés au début de la phase de conception détaillée (*voir la section 4.2.2. Identification des chargements*). Pour diminuer le temps du test et la consommation d'essence, les obstacles (courbes, dos-d'âne, bosses, etc.) pourraient être disposés à une distance minimale, permettant ainsi le changement rapide de sollicitations dans le système châssis.

Le développement d'une procédure d'essai physique qui répondra aux besoins du client et aux critères de conception qui font partie du cahier des charges constituerait donc une perspective de recherche dans le domaine du développement de produits récréatifs.

La méthodologie détaillée de conception et de validation appliquée et intégrée dans l'industrie de produits récréatifs fait également l'objet de l'article 5 (voir l'annexe F) qui a été soumis pour évaluation et publication, au journal A.S.M.E.

### 4.3 Optimisation des composantes structurales périphériques

Dans le contexte où la réduction de la masse du véhicule reste un critère de conception très important, l'optimisation des composantes périphériques est nécessaire. Pour y arriver, les méthodologies développées dans le cadre du présent projet de recherche pourraient être appliquées à plusieurs composantes du véhicule (guidon, bras de suspension arrière, différentes composantes de l'ensemble carrosserie, miroirs, corps d'éclairage, etc.).

Comme les méthodologies le montrent, tous les types de critères de conception devraient être pris en considération quand on développe un produit ou une composante de ce dernier. Par exemple, si on s'intéresse à l'optimisation de la masse du bras de suspension arrière, il faudra analyser également son comportement mécanique et si les coûts globaux engendrés par cette optimisation n'affectent pas le prix du véhicule. Le temps de fabrication et d'assemblage doit être aussi pris en considération par l'équipe multidisciplinaire.

Donc, en fonction du contexte de développement des produits (*nouveau produit, évolution d'un produit existant, ou produit adapté*), toutes les étapes à l'intérieur du PDP doivent être franchies.

Le temps ne nous permet pas, dans le cadre du projet, d'effectuer une optimisation d'autres composantes périphériques du véhicule, mais on fournit quelques techniques et lignes directrices qui devraient être appliquées à l'égard des méthodologies proposées pour les trois contextes de développement de produits rencontrés :

- Revoir le cycle de vie total du produit, du sous-système, ou de la composante à partir de la production initiale jusqu'au recyclage ou au stockage final, toujours avec un œil sur les risques éventuels ;
- Se demander quel type de situation peut raisonnablement se développer au cours des différentes étapes de fabrication, de transport, de stockage, d'installation, d'utilisation et ainsi de suite ;
- Faire le plus possible de la sécurité une caractéristique intégrée dans la conception, plutôt que d'ajouter des dispositifs de sécurité à l'étape de fabrication ;
- Intégrer une conception « fail-safe » où celle-ci est faisable. Cette philosophie est basée sur le fait que des précautions seront prises pour éviter la défaillance brutale du produit, mais si cette dernière se produit, la conception sera telle que le produit sera encore sûr et donc les conséquences de la défaillance ne seront pas catastrophiques ;



- Vérifier les normes gouvernementales et industrielles telles qu'OSHA ou la norme ANSI et la littérature technique pertinente pour s'assurer que les exigences légales sont respectées. Voici un exemple d'une recommandation concernant les véhicules tout-terrain, trouvé sur le site d'OSHA :

*“ATVs are engineered for certain operating conditions and for handling specific loads. Modifications to an ATV may alter its performance and increase the potential for an accident. Any modification to an ATV should be performed only after obtaining approval from the manufacturer. Modification includes the use of after-market products that are sold as accessories. Employers and drivers should read the operator's manual to understand the limitations of ATVs. The cargo (front and rear racks) and passenger weight limits of an ATV should not be exceeded because it affects the ATV's manoeuvrability and performance. As stated earlier, exceeding an ATV's weight capacity is a common cause of serious ATV accidents.”*

*[OSHA-Hazards Associated with All-Terrain Vehicles (ATVs) in the Workplace]*

- Étant donné que les ingénieurs qui développent un produit sont dans la meilleure position pour identifier les risques liés à sa conception, ils doivent fournir des avertissements pour tous les dangers importants qui restent même après la conception sécuritaire du produit. Les avertissements devraient être conçus afin d'apporter l'information à l'attention des personnes en danger de la manière la plus positive possible. Généralement, les avertissements visibles attachés sur le produit de façon permanente sont les meilleurs (ex. : les avertissements concernant les coussins gonflables dans un véhicule). Il existe également des normes OSHA et ANSI en ce qui concerne les signes d'alerte. Des informations plus détaillées concernant les avertissements liés à l'utilisation du produit seront incluses dans le manuel d'exploitation qui accompagnera le produit ;
- Évaluer plusieurs alternatives (concepts) qui respectent les critères quantitatifs de 1<sup>er</sup> ordre, en fonction de :
  - La possibilité que d'autres dangers puissent être introduits par les solutions proposées (ex. : les déplacements engendrés dans le châssis par un changement de matériau) ;

- Leur effet sur l'exploitation ultérieure du produit (ex. : les philosophies de châssis 2D et 3D, voir la figure 26) ;
- Leur effet sur le prix de commercialisation du produit (ex. : soudage vs collage, acier vs aluminium) ;
- Leur comparaison avec des produits similaires qui se trouvent sur le marché (ex. : Châssis de référence vs. Nouveau Châssis).

Avec ces lignes directrices, les méthodologies de conception et validation proposées représentent d'un point de vue organisationnel, un outil très efficace pour l'équipe multidisciplinaire chargée de l'optimisation d'autres composantes structurales du nouveau véhicule récréatif à trois roues.

## CHAPITRE 5 CONCLUSION

Les travaux liés aux étapes du PDP, effectués dans un contexte industriel permettent de tirer une conclusion générale quant au sujet de la recherche concernant le développement de méthodologies de conception et validation pour les produits et composants structuraux. La méthodologie développée est basée sur l'identification des chargements, la simulation numérique des chargements réels, la simulation numérique sur la machine d'essais, les tests expérimentaux et les tests physiques. La chronologie proposée pour ces activités permet tout d'abord une réduction du nombre d'itérations à l'étape de validation expérimentale. Ensuite, cette méthodologie permet une rétroaction sur les besoins du client et assure le lien entre les critères de conception (*spécifications+CdCF*) et les paramètres de validation (*procédures, gabarit, chargement sur la machine*).

### 5.1 Contributions de l'approche dans les domaines académique et industriel

Dans cette section, on dénombre quelques contributions apportées par les méthodologies proposées dans le processus de conception et validation de produits, tant dans le domaine académique que dans le domaine industriel. Ainsi, trois contributions ont été identifiées au niveau du domaine académique :

- Contribution dans la littérature scientifique avec trois articles de conférence et un article de journal sur la formalisation des méthodologies de conception et validation à la phase de conception détaillée dans le cadre du PDP. Les articles contribuent dans le domaine académique en intégrant plusieurs approches qui peuvent être utilisées pour la prévention des défaillances dans le processus de développement de produits. Les approches proposées dans les articles sont appuyées par des exemples tirés de l'industrie des produits récréatifs pour souligner leur pertinence et leur efficacité ;
- La méthodologie de conception et validation développée et appliquée dans le cadre du projet APC sur le système de châssis de référence, a eu une influence significative sur

l'optimisation de divers critères de conception (ex. : coût, masse, processus de fabrication, durée de vie, etc.) durant le processus de développement du système châssis pour le nouveau véhicule récréatif hybride à trois roues. La méthodologie de conception et validation développée dans le cadre du projet de recherche, sera mise à la disposition des étudiants du département de génie mécanique de l'UdeS pour qu'ils puissent mieux évaluer les étapes à franchir dans le cadre de leurs projets de fin de baccalauréat en termes de faisabilité, d'échéances et de respect des critères mécaniques établis à l'étape d'identification des chargements ;

- La communication dans le milieu académique au niveau du PDP, sera significativement améliorée en utilisant le processus formalisé de conception et validation de produits. La présentation d'une manière uniforme et claire des types de critères et des méthodologies de conception de produits permet la prise en considération de tous les enjeux qui entourent un produit (critères de performance, critères économiques, critères qualitatifs).

En ce qui concerne les contributions dans le milieu industriel, quelques améliorations ont été identifiées après l'application de la méthodologie dans le domaine de produits récréatifs :

- L'outil de planification graphique (méthodologie) développé, permet aux ingénieurs d'avoir dès le début du processus de développement d'un produit ou d'une composante, une vue d'ensemble des différentes étapes à effectuer, de l'étape d'identification des chargements jusqu'à la validation finale du produit ;
- La possibilité d'associer des ressources humaines, matérielles et financières aux activités de conception et validation par le biais de la méthodologie développée représente également une contribution de celle-ci dans le milieu industriel ;
- Comme dans le milieu académique, la méthodologie développée rend plus facile la communication liée aux activités de conception et validation, auprès des membres de l'organisation (gestionnaires, nouveaux ingénieurs, techniciens, managers, etc.). Son caractère itératif permet, après la validation finale, une rétroaction sur les besoins du client et sur les exigences du produit établis à la phase d'analyse des critères ;
- La nouvelle étape de validation numérique intégrée dans la méthodologie proposée (AÉF2) a amélioré significativement la précision des résultats des tests expérimentaux, tout en gardant un lien entre les chargements réels et les chargements appliqués par la

machine des tests. De cette manière, la prévention des défaillances est assurée et le nombre d'itérations à l'étape des essais expérimentaux sera minimisé tout en évitant le surdimensionnement du produit. L'étape de validation numérique a permis également l'identification assez précise des chargements à appliquer par la machine de tests, **chargements qui devraient répliquer le plus fidèlement possible les sollicitations dans des conditions normales d'utilisation.**

- **La possibilité d'avoir toujours une corrélation entre les chargements réels et les chargements expérimentaux va permettre également une évaluation de la durée de vie d'un produit dans des conditions de tests accélérés (nombre réduit de cycles).**

L'implémentation de la méthodologie dans le PDP d'une composante structurale d'un véhicule récréatif nous a démontré que toutes les étapes de la méthodologie sont très importantes et que le contournement d'une étape peut compromettre les résultats des étapes ultérieures.

Cependant, l'application de la méthodologie se limite aux produits et aux composants structuraux dans l'industrie d'automobile est de véhicules récréatifs, pour lesquels l'analyse de leur durée de vie est incontournable. Le caractère très spécifique de la méthodologie permette l'optimisation du produit à la phase de conception détaillée du PDP. En contrepartie, les domaines d'application restent encore assez limités et des méthodologies spécifiques à d'autres branches du domaine industriel pourraient être développées.

## 5.2 Perspectives de recherche dans le domaine des méthodologies de conception et de validation de produits

Ce projet de recherche a été entamé afin d'intégrer dans le PDP l'optimisation et la validation des produits structuraux, ainsi que pour améliorer l'organisation des étapes à l'intérieur du processus.

Dans une première étape, une revue bibliographique a été effectuée permettant une mise à jour de l'état des connaissances dans le domaine de la théorie du développement et de la validation des produits récréatifs. Durant cette étude il a été trouvé, dans le cadre du PDP, qu'il n'y avait pas de méthodologie formalisée et assez détaillée qui permette d'assurer une concordance entre les spécifications initiales du produit et les paramètres de validation de ce

dernier. Un autre aspect très important à retenir est que l'étape de validation expérimentale du châssis d'un véhicule récréatif était, par le passé, effectuée à l'aide de trois différents types de fixation (voir l'annexe B). Il a également été trouvé qu'il est possible d'effectuer des essais expérimentaux accélérés en réduisant ainsi la durée des tests et les coûts associés à cette étape de développement des produits.

- Une perspective de recherche très intéressante serait le développement des méthodologies détaillées de conception et de validation pour tous les sous-systèmes d'un véhicule récréatif. Par exemple, dans le cas du véhicule récréatif à trois roues, une méta-méthodologie qui présente toutes les étapes à effectuer tout au long du processus de développement du produit et qui couvre tous les domaines de génie (sous-système direction, sous-système propulsion, sous-système électrique, sous-système informatique, etc.) serait un excellent outil pour permettre aux membres des équipes multidisciplinaires de comprendre tous les enjeux liés au produit. Cette méta-méthodologie formalisée serait également utile pour une meilleure communication à l'intérieur de l'équipe multidisciplinaire ce qui induirait certainement une augmentation des compétences de ses membres.
- La méthodologie de conception et validation proposée et les cas de chargements identifiés dans le cadre du projet de recherche, pourraient maintenant être appliqués au châssis du nouveau véhicule récréatif où sur d'autres pièces périphériques de ce dernier afin de les optimiser tout en respectant les critères de conception établis à l'étape de conception préliminaire (durée de vie, coût, poids, assemblage, fabrication, etc.).
- Le développement d'une méthode d'essai physique qui répondra aux besoins du client et aux critères de conception qui font partie du cahier des charges constituerait une autre perspective de recherche dans le domaine du développement des produits récréatifs. Par exemple, un trajet représentatif pour toutes les sollicitations identifiées à l'étape de l'étude des chargements pourrait être développé afin de valider la fiabilité du produit ou du sous-système dans des conditions réelles d'utilisation.

La possibilité de corréler les chargements réels, les simulations par éléments finis et les tests en laboratoire permettra aux ingénieurs de trouver les meilleures combinaisons géométrie/matériau pour les composantes développées ou optimisées. De cette manière, les produits développés respecteront les critères de fiabilité, coût et poids tout en évitant leur surdimensionnement.

## ANNEXE A :

### Élaboration des procédures spécifiques de validation de produits

Cette section comporte 5 sujets sur les différents essais qu'il est possible d'effectuer sur une machine d'essais en fatigue MTS. Ce « guide » d'utilisation de la machine de traction MTS, rédigé avec l'apport de M. Philippe Pellerin et M. Stéphane Kannapel (ingénieurs stagiaires au département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke), représente un outil très efficace pour les ingénieurs et/ou pour les étudiants impliqués dans des projets de conception et validation des pièces structurales [63]:

- i. Pilotage manuel de la machine d'essais
- ii. Essai avec une procédure simple (menu *Basic TestWare*)
- iii. Essai avec une procédure pouvant être multipliée (menu *Multi Purpose TestWare*)
- iv. Essai avec un signal complexe contrôlé par un fichier texte
- v. Acquisition et interprétation des données
- vi. Algorithmes théoriques sur les essais en fatigue

#### i. Pilotage manuel de la machine d'essais

Le pilotage manuel sert à positionner le vérin pour effectuer le montage sur la table de test.

- Dans la partie *Station Controls*, cliquer sur l'icône *Manual Command* (figure 53)

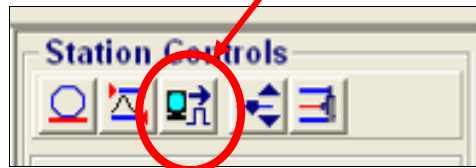


Figure 53: Icône *Manual Command*

- La fenêtre *Manual Command* apparaît (figure 54):

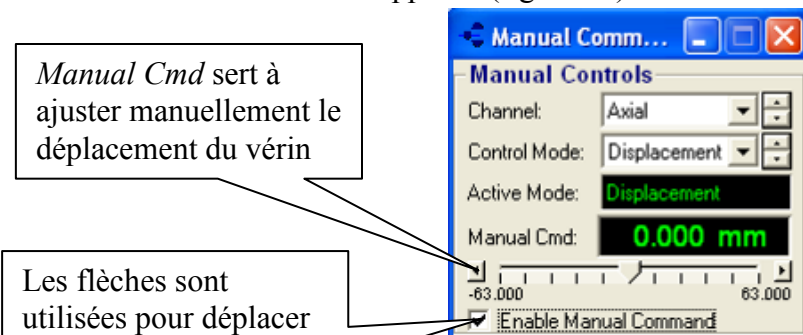


Figure 54: Fenêtre du *Manual Command*

- Choisir le mode de contrôle désiré (*effort* ou *déplacement*)
- Cocher ensuite la case *Enable Manual Command*
- Ensuite le déplacement manuel du vérin sera fait par l'intermédiaire du curseur ou en entrant directement une valeur désirée (absolu).
- Attention : Si le vérin est contrôlé en effort, une commande trop drastique de variation en effort pourrait briser l'échantillon ou la pièce à tester. Il est donc conseillé de faire varier doucement la commande.

## ii. Essai à partir du *Basic TestWare*

Comme son nom l'indique, cette option permet de réaliser des tests simples ne comprenant qu'un seul type de commande [63]. De plus, les procédés de détections et d'acquisitions sont très cadrés. En résumé, ce programme est idéal pour réaliser des essais de fatigue très simple. Mais dès que des choses plus évoluées doivent être faites, il faut passer à l'autre programme de pilotage disponible : le Multi Purpose TestWare (MPT) [63]. Toutes les options de ce programme peuvent se régler depuis la fenêtre *Test Setup*, accessible depuis la barre d'outils du *Basic TestWare*, comme l'illustre la figure 55.

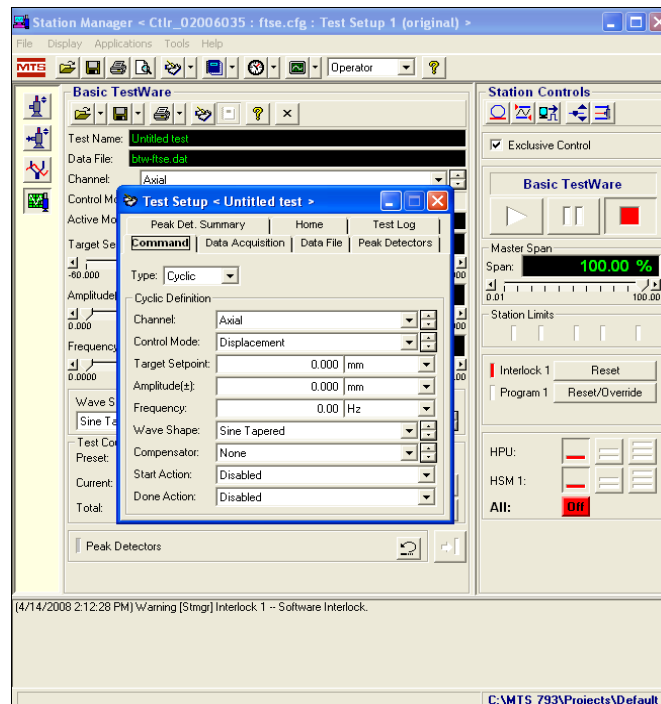


Figure 55: Fenêtre *Test Setup* du *Basic TestWare*



Les onglets *Data Acquisition* et *Data File* permettront de spécifier les signaux que les ingénieurs veulent enregistrer, dans quel type de fichier et à quel endroit.

Les principales options de ce programme peuvent aussi se modifier directement depuis la fenêtre principale du programme *Basic TestWare*, illustrée à la figure 56.

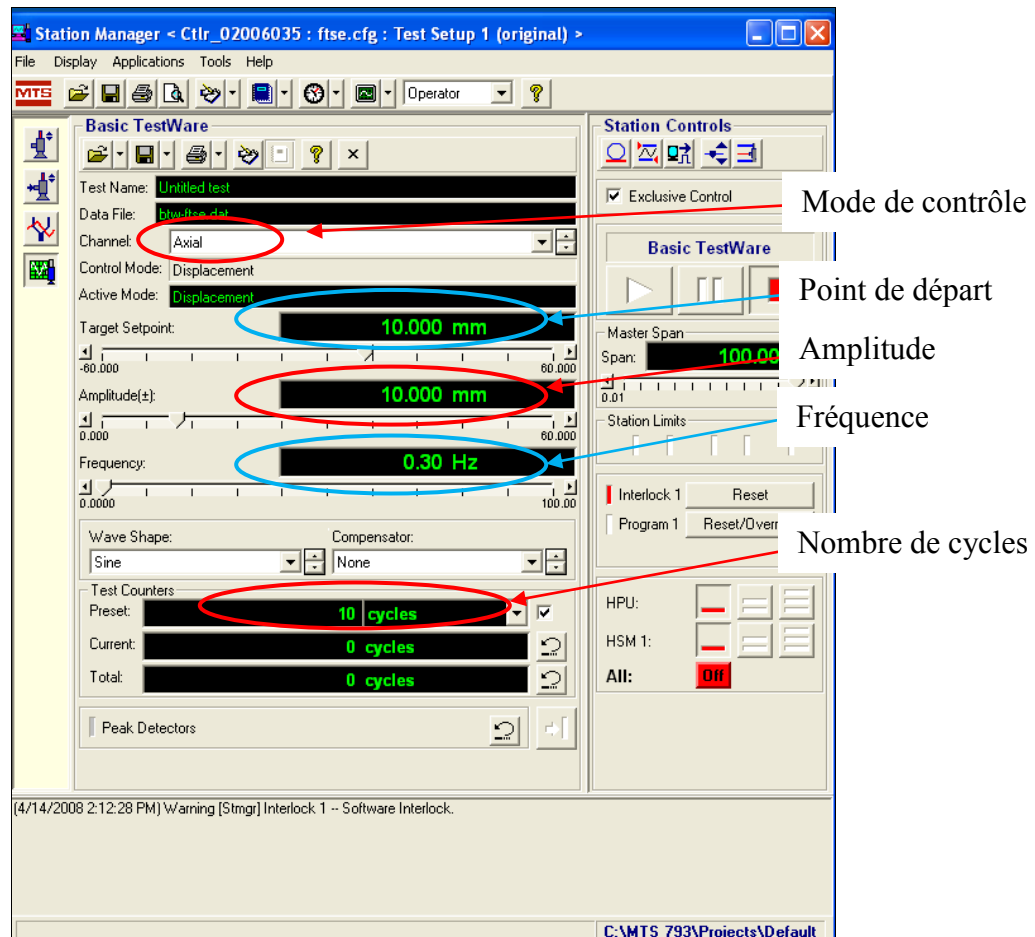


Figure 56: Fenêtre principale du programme *Basic TestWare*

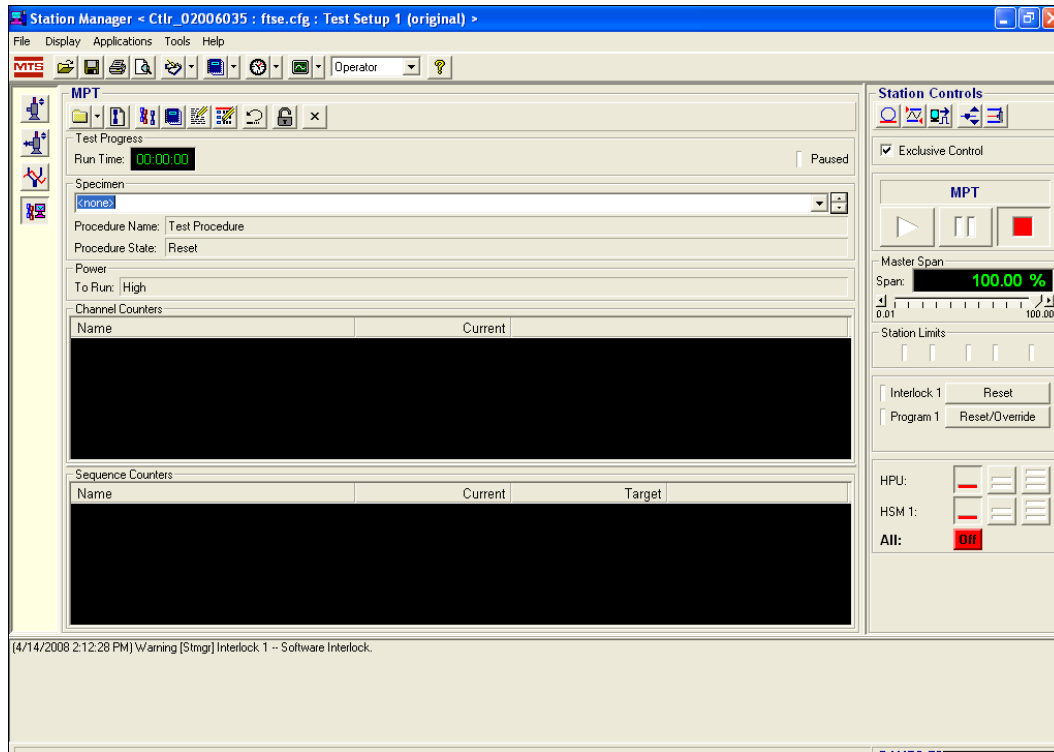
Une fois que le plan d'essai est défini et que les divers paramètres sont entrés dans les options du *Basic TestWare*, le test peut être lancé.

### iii. Essai à partir du *MultiPurpose TestWare*

Ce programme permet de réaliser des essais de fatigue beaucoup plus évolués, tel que simuler les conditions réelles dans lesquelles va se retrouver la pièce testée.

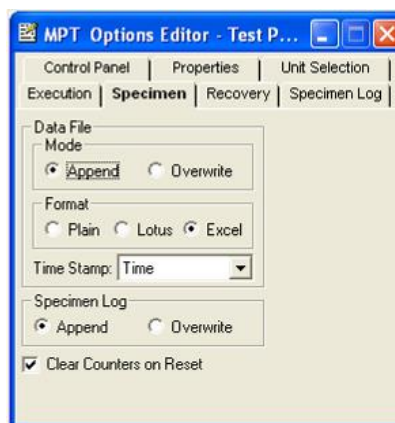
Pour lancer ce programme, allez dans *Applications*, puis *Multi Purpose TestWare*. Attention, un MPT et un Basic TestWare ne peuvent être ouverts en même temps.

Voici l'interface, illustrée à la figure 57 :



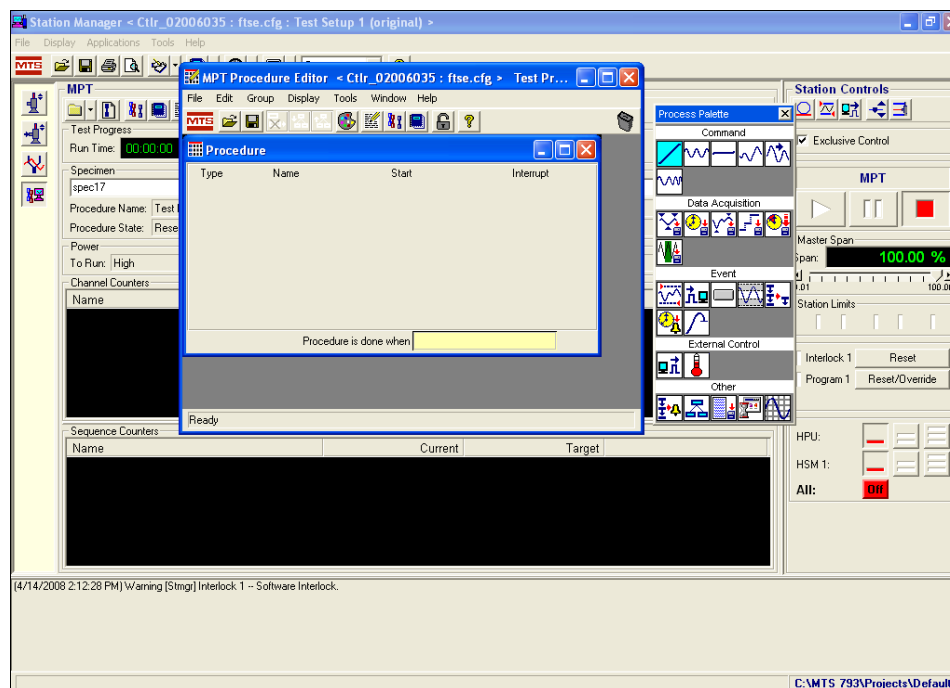
**Figure 57: Interface du Multi Purpose TestWare**

La première chose à faire est de définir un *Specimen*. C'est en fait sous ce nom de fichier que seront stockés tous les paramètres et résultats de cet essai. De nombreuses options sont disponibles pour cela [63]. Pour plus de détails, se référer au manuel *Model 793.10 MultiPurpose TestWare*, p.26. Il y a aussi la partie option à régler, qui détaille les paramètres généraux pour le MPT, tel qu'illustré à la figure 58.



**Figure 58: Fenêtre du MPT Options Editor**

Ensuite, il faut créer la procédure permettant de simuler le comportement souhaité, grâce au *MPT Procedure Editor* (figure 59). Il suffit de faire glisser divers éléments de la *Process Palette* vers la *Procedure* et de paramétrer correctement ces éléments. Un exemple détaillé et bien expliqué est disponible dans le livre *MultiPurpose Testware*, p.35 à 66.



**Figure 59: Fenêtre du MPT Procedure Editor**

Il y a aussi la possibilité de créer des sous procédures, comme illustré à la figure 60.

Le nombre de procédures, combinant, commande, acquisition, évènements, contrôle externe sont quasiment infinis. On peut créer la procédure que l'on souhaite et qui se rapproche le plus du type de test réalisé.

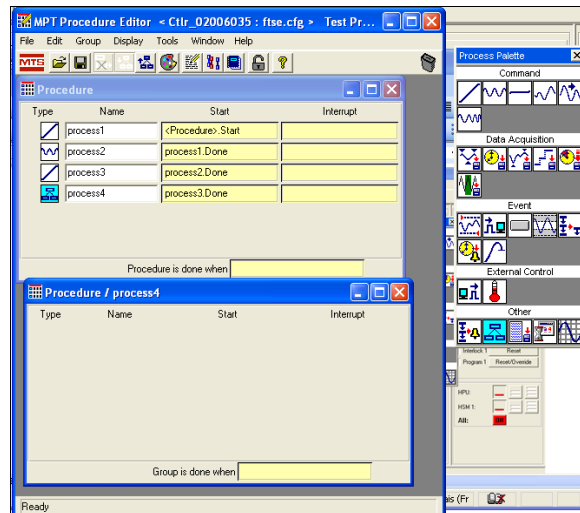


Figure 60: Fenêtre pour créer des sous-procédures

### iii.1.Procédure d'un essai de traction (Essai sans cyclage)

Pour effectuer un essai de traction, il faut créer une procédure comme par exemple «*Test\_Traction*». La procédure *Test\_Traction* est illustrée à la figure 61.

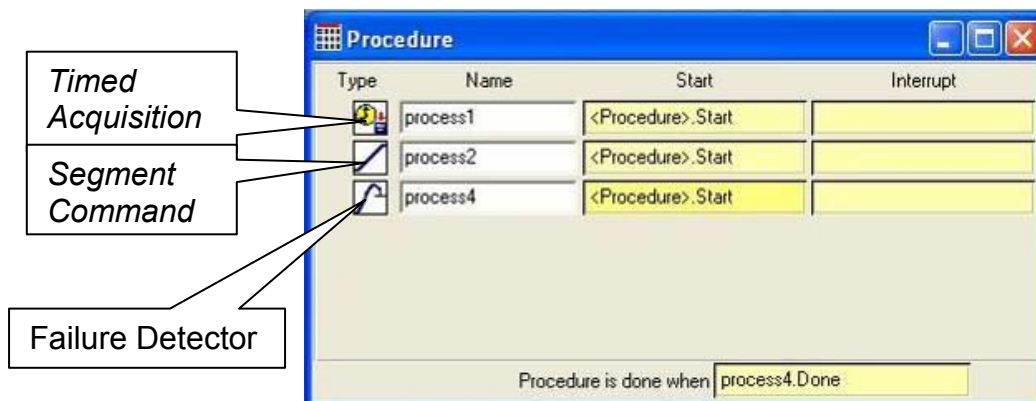


Figure 61: Procédure *Test\_Traction*

Pour résumer la procédure, on commence l'acquisition des signaux, on augmente de façon constante le déplacement ou la force jusqu'à ce qu'il y ait rupture ou jusqu'à ce que la limite choisie soit atteinte. Chaque élément peut être modifié de la procédure en double-cliquant dessus. Lorsque l'on double-clique sur l'icône *Timed Acquisition*, la figure 62 apparaît.

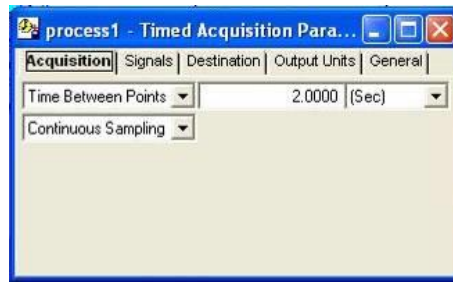


Figure 62: Onglet Acquisition de l'objet *Timed Acquisition*

L'onglet Acquisition permet de spécifier le temps entre chaque point de mesure. Il faut prévoir un temps qui permettra d'avoir une bonne précision, mais qui ne fera pas un fichier volumineux. L'onglet *Signals*, figure 63, permet de choisir les signaux que l'on veut mesurer.



Figure 63: Onglet *Signals* de l'objet *Timed Acquisition*

À l'onglet *Destination*, (figure 64), il est important de laisser le *Buffer Type* à *Linear* et de cocher la case *Write First Data Header Only*. Pour plus de détails à ce sujet, consulter la page 278 du livre *MultiPurpose TestWare*. Lorsque l'on double-clique sur l'icône *Segment Command*, la figure 65 apparaîtra.



Figure 64: Onglet *Destination* de l'objet *Timed Acquisition*

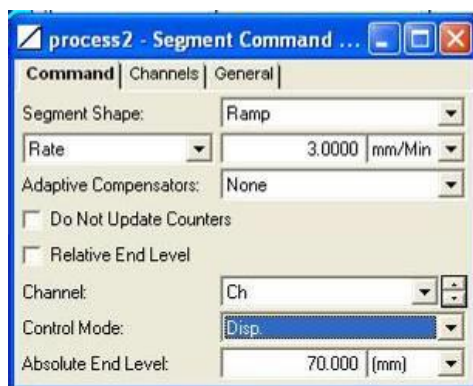


Figure 65: Onglet *Command* de l'objet *Segment Command*

On peut alors avec le *Control Mode* contrôler le vérin en effort ou en déplacement et contrôler la vitesse de celui-ci. Finalement, on mentionne quand la course doit se terminer (fixation de la limite) à l'aide de la section *Absolute End Level*. Pour une rampe, il n'est pas nécessaire de mettre un compensateur donc on laisse *Adaptive Compensators* à *None* puisqu'il s'agit d'un signal simple.

Lorsque l'on double-clique sur l'icône *Failure Detector*, la figure 66 apparaît.

Le détecteur de rupture permet d'arrêter la procédure automatiquement lorsqu'une rupture est détectée. Plus de détails sont fournis à ce sujet dans le livre MultiPurpose TestWare, à la page 380.

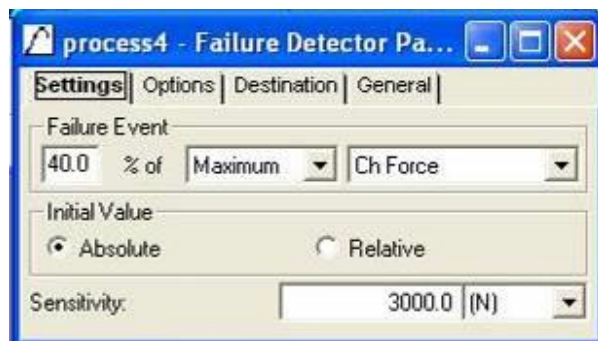


Figure 66: Onglet *Settings* de l'objet *Failure Detector*

### iii.2.Procédure d'un essai en fatigue (Essai avec cyclage)

Pour effectuer un essai en fatigue, il faut créer une procédure comme par exemple «*Test\_fatigue*». Celle-ci est illustrée à la figure 67.

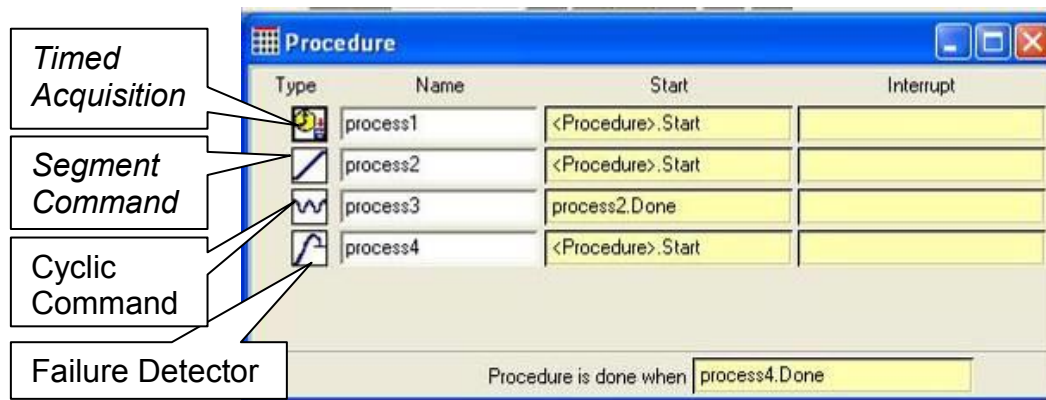


Figure 67: Procédure Test\_Fatigue

Pour résumer la procédure, on commence l'acquisition des signaux, on augmente de façon constante le déplacement ou la force jusqu'à un niveau voulu. Une fois ce niveau atteint, un signal cyclique commence durant un nombre de cycles donné. Durant toute la procédure, un détecteur de rupture est actif et arrête la procédure si une rupture ou une déformation trop importante est détectée.

Chaque élément de la procédure pourra être modifié en double-cliquant dessus. Lorsque l'on double-clique sur l'icône *Timed Acquisition*, la figure 68 apparaît.

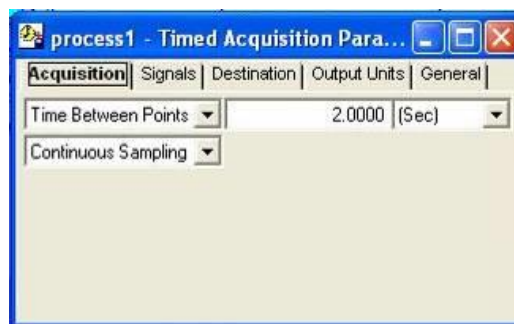


Figure 68: Onglet Acquisition de l'objet *Timed Acquisition*

L'onglet Acquisition permet de spécifier le temps entre chaque point de mesure. Il faut prévoir un temps qui permettra d'avoir une bonne précision, mais qui ne fera pas un fichier volumineux.

L'onglet *Signals*, qui est illustré dans la figure 55, permet de choisir les signaux que l'on veut mesurer.

On peut alors avec le *Control Mode* contrôler le vérin en effort ou en déplacement et contrôler la vitesse de celui-ci. Finalement, on mentionne quand la course doit se terminer à l'aide de la section *Absolute End Level*. Pour une rampe, il n'est pas nécessaire de mettre un

compensateur donc on laisse *Adaptive Compensators* à *None* puisqu'il s'agit d'un signal simple.

Lorsque l'on double-clique sur l'icône *Cyclic Command*, la figure 69 apparaît.

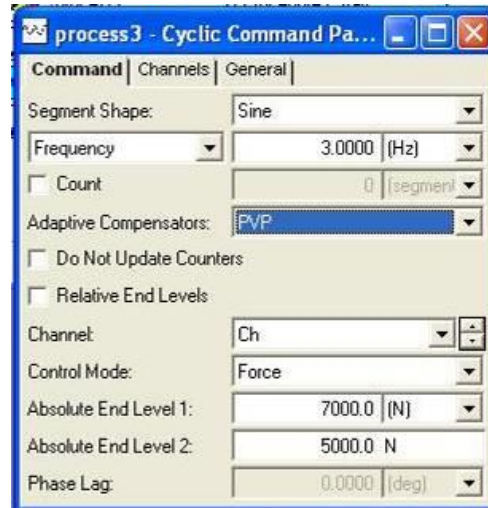


Figure 69: Onglet *Command* de l'objet *Cyclic Command*

On peut alors modifier le *Segment Shape*, la fréquence du signal, le niveau minimum du signal (*Absolute End Level 1*) et le niveau maximum du signal (*Absolute End Level 2*). Pour plus de détail, voir la page 214 du livre *MultiPurpose TestWare*

Pour un signal cyclique, **il est fortement recommandé d'utiliser un compensateur, *Adaptive Compensators*, de type *PVP*.**

Finalement, lorsque l'on double-clique sur l'icône Détecteur de rupture, la figure 70 apparaît.

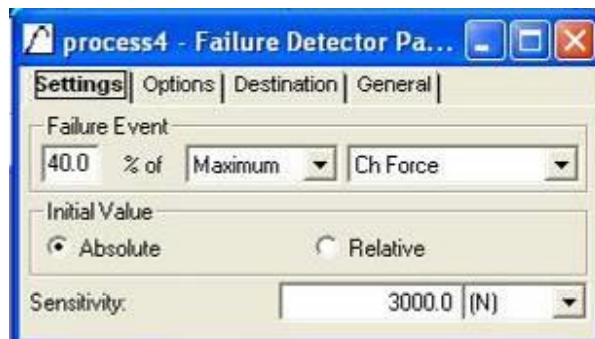


Figure 70: Onglet *Settings* de l'objet *Failure Detector*



Le détecteur de rupture permet d'arrêter la procédure automatiquement lorsqu'une rupture est détectée. Plus de détails vous sont fournis à ce sujet dans le livre *MultiPurpose TestWare*, à la page 380.

#### iv. Essai avec un signal complexe contrôlé par un fichier texte :

Pour effectuer des essais avec des signaux plus complexes, plus près des conditions réelles auxquelles sera soumis l'échantillon au cours de son utilisation, il est possible de contrôler le vérin en passant par un fichier texte.

Le fichier texte permet de faire des signaux plus complexes, comme l'illustre la figure 71.

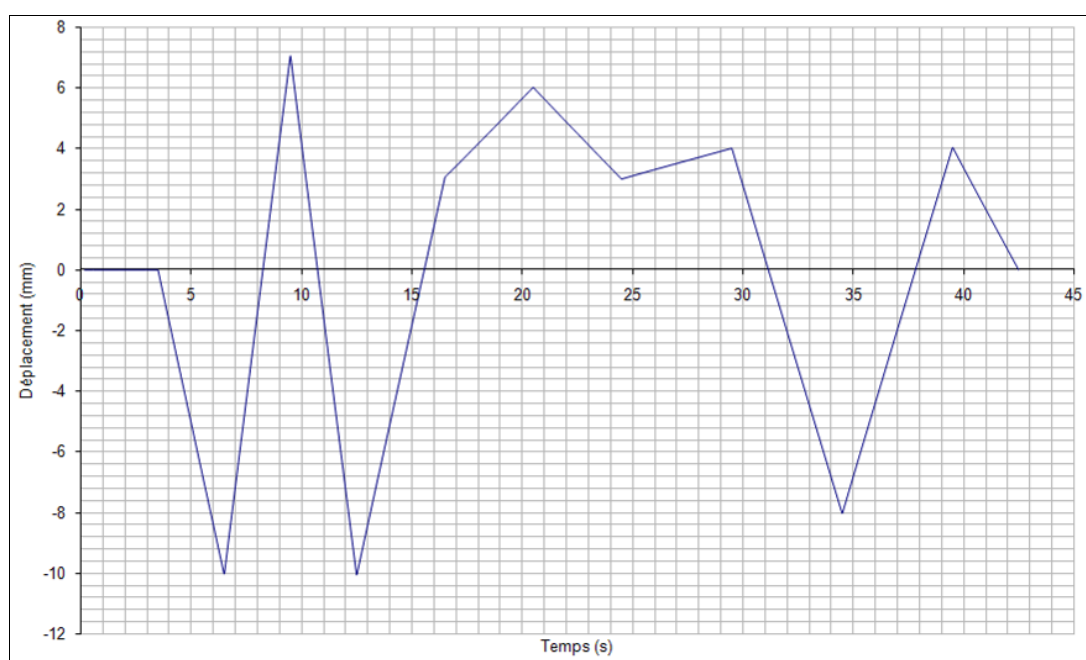


Figure 71: Signal complexe contrôlé par un fichier texte

Pour effectuer un essai avec un signal complexe, il faut créer la procédure *TestProfile*.

#### v. Récupération et traitement des données

Le nom du *specimen* sert à la création des dossiers où seront stockées les informations. Par exemple, si le *specimen* se nomme Test01, les données de l'essai seront stockées dans le dossier C:\ftse\mpt\specimens\ Test01. Plusieurs fichiers sont créés, le plus important est le specimen.dat. Pour traiter les données, il faut ouvrir Excel, cliquer sur Ouvrir puis sur tous les fichiers, comme l'illustre la figure 72.

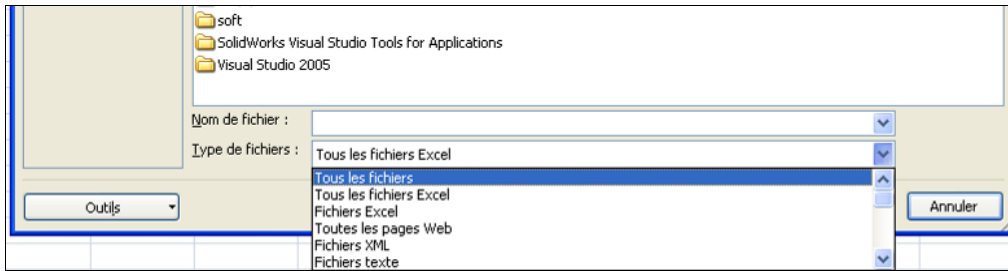


Figure 72: Ouverture de tous les fichiers dans Excel

Ensuite, si on double-clique sur le fichier *Specmien.dat.*, une fenêtre ouvre, (figure 73), cliquez sur *Terminer*. Maintenant les données peuvent être traitées.

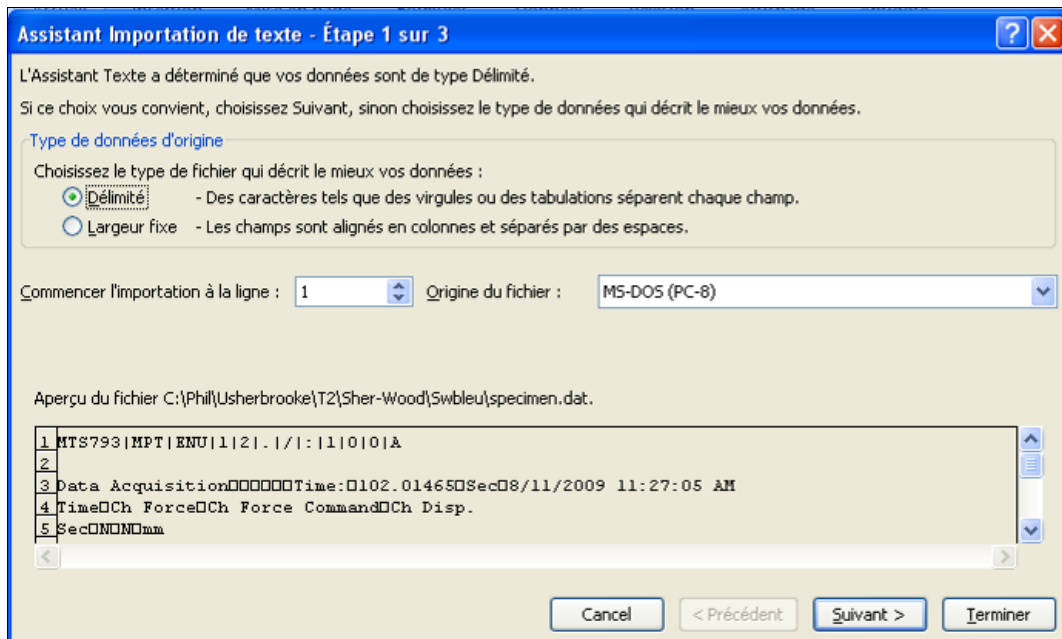


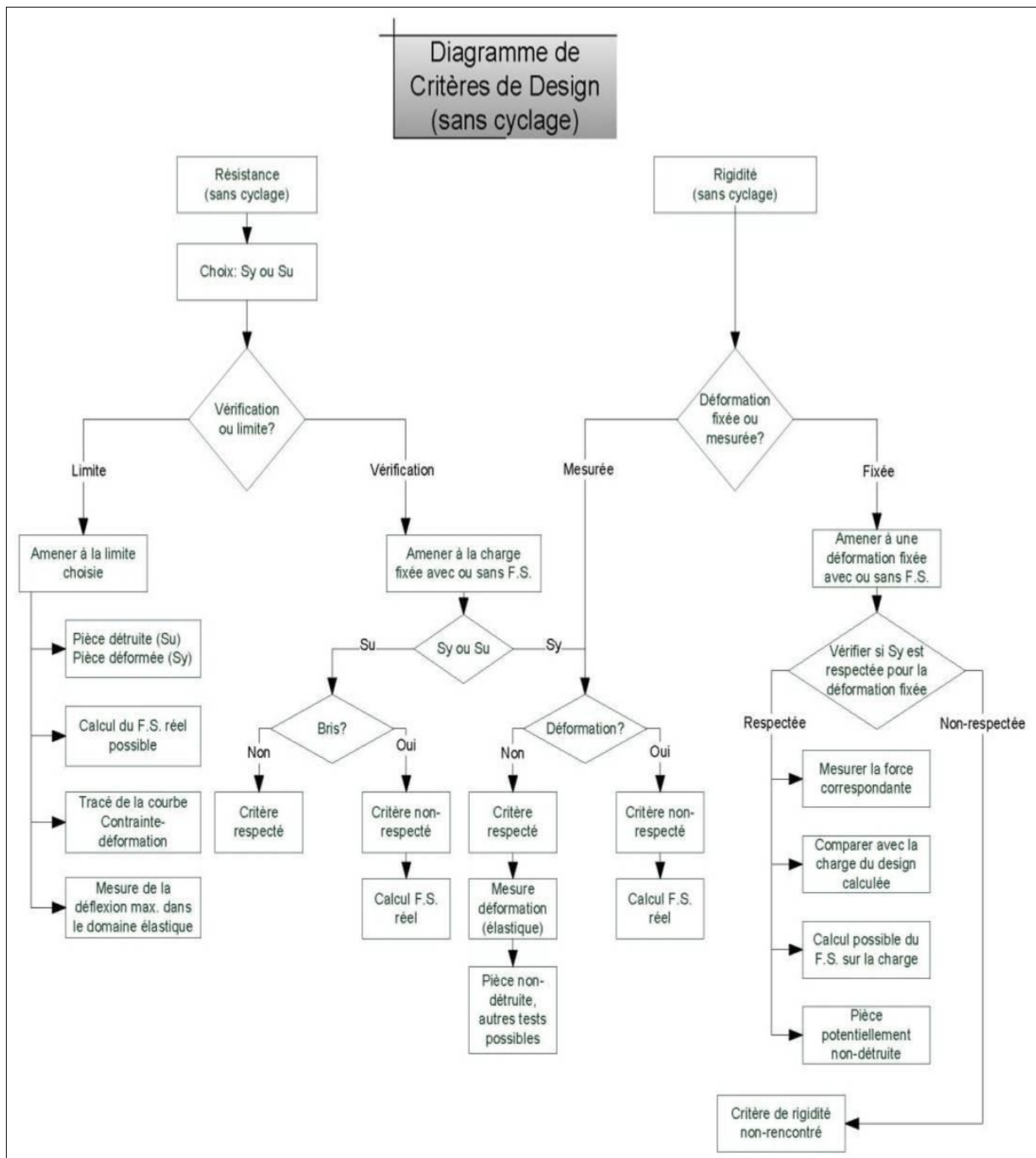
Figure 73: Importation d'un fichier .dat dans Excel

Dans la présente annexe, plusieurs procédures d'utilisation de la machine d'essais en fatigue ont été détaillés. D'autres procédures d'utilisation de la machine ont été développés et la référence [63] représentent une bonne source d'information pour les utilisateurs d'une telle machine.

## vi. Algorithmes théoriques sur les essais en fatigue

Avant d'effectuer un cyclage en fatigue, plusieurs questions doivent être posées et des réponses doivent être trouvées. Les deux diagrammes suivants, sans cyclage figure 74 et avec cyclage figure 75, aident beaucoup à ce processus. Aucun essai ne devrait être fait sans que la personne responsable du projet ait regardé en détail ces deux diagrammes.

Si un essai sans cyclage sera fait, il faudra partir de la procédure *Test\_Traction*, détaillée au point iii. A. de la présente annexe.



**Figure 74: Diagramme de Critères de Conception (sans cyclage)**

Si un essai avec cyclage sera fait, il faudra partir de la procédure *Test\_fatigue*, détaillée au point iii.2. dans la présente annexe.

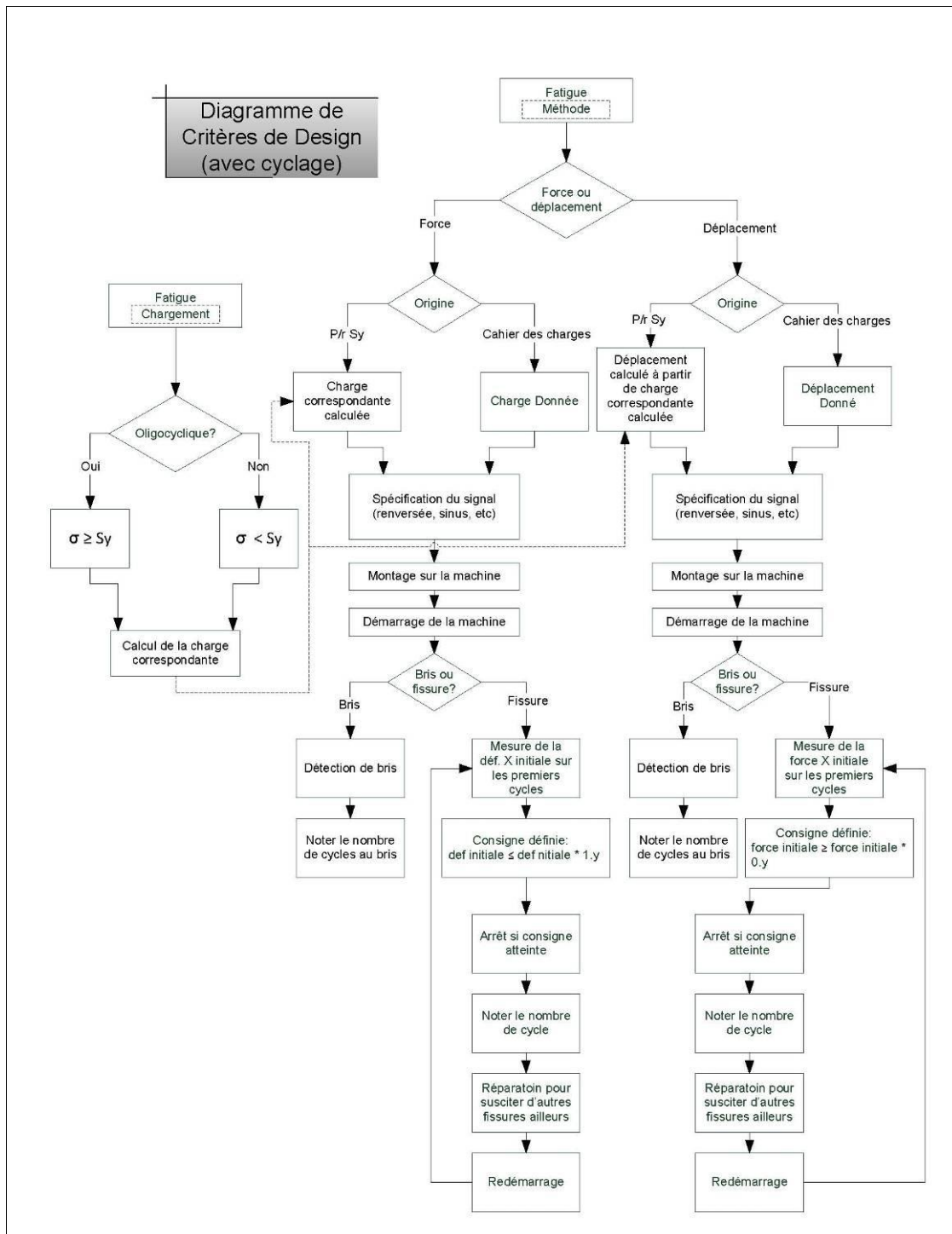


Figure 75: Diagramme de Critères de Conception (avec cyclage)

## ANNEXE B :

### Approche relative de validation en fatigue du sous-système châssis

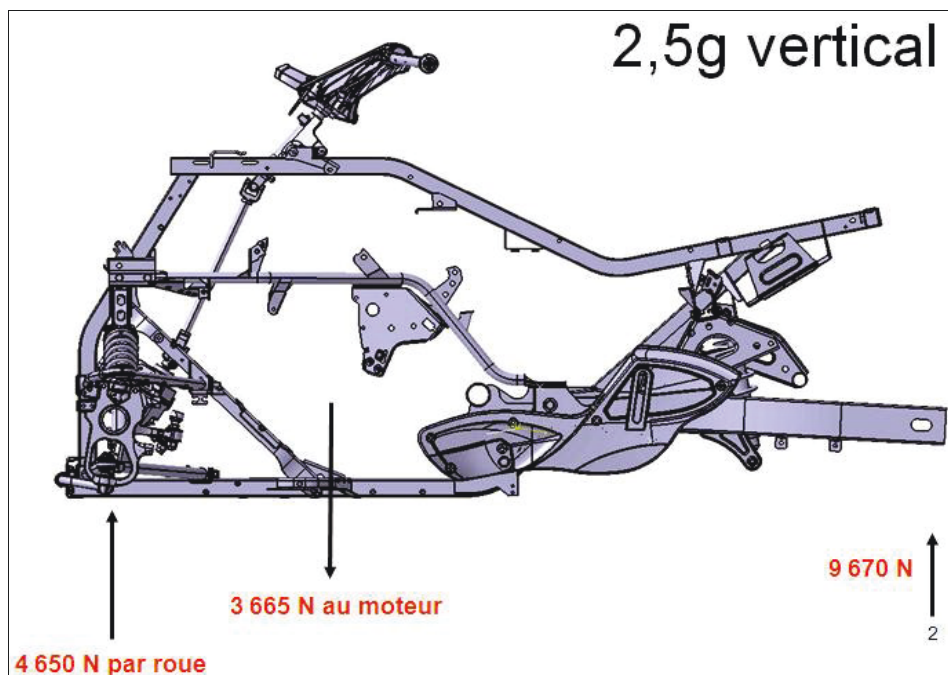


Figure 76: Approche de validation relative (spectre de cyclage vertical)

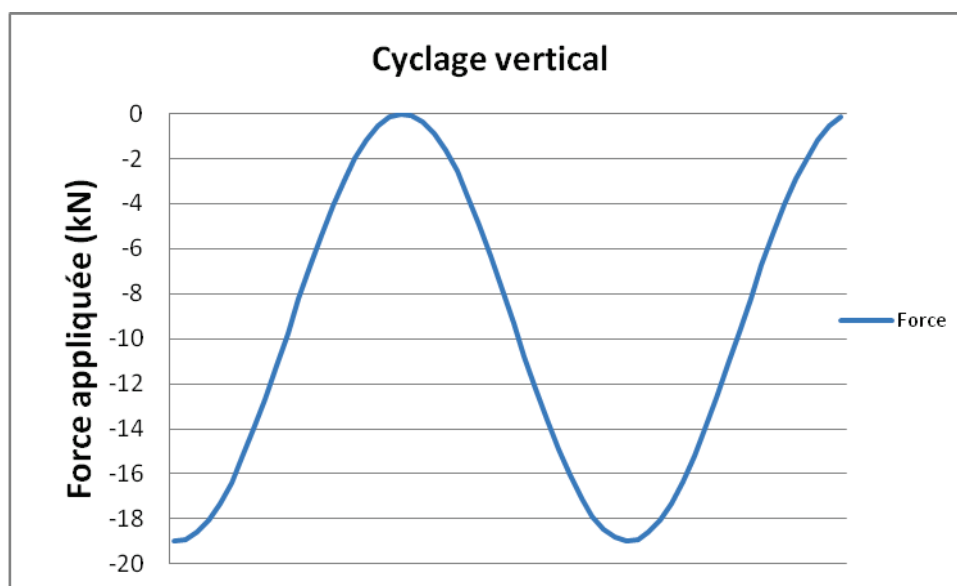


Figure 77: Variation de la force dans le spectre de cyclage vertical, effectué sur l'ensemble châssis RT (données de laboratoire)

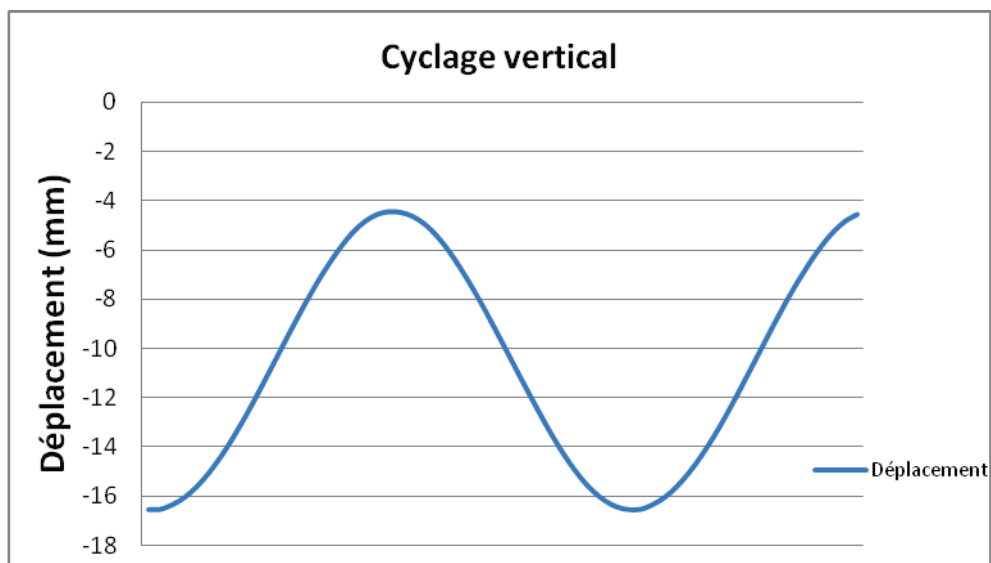


Figure 78: Variation du déplacement dans le spectre de cyclage vertical, effectué sur l'ensemble châssis RT (donnée de laboratoire)

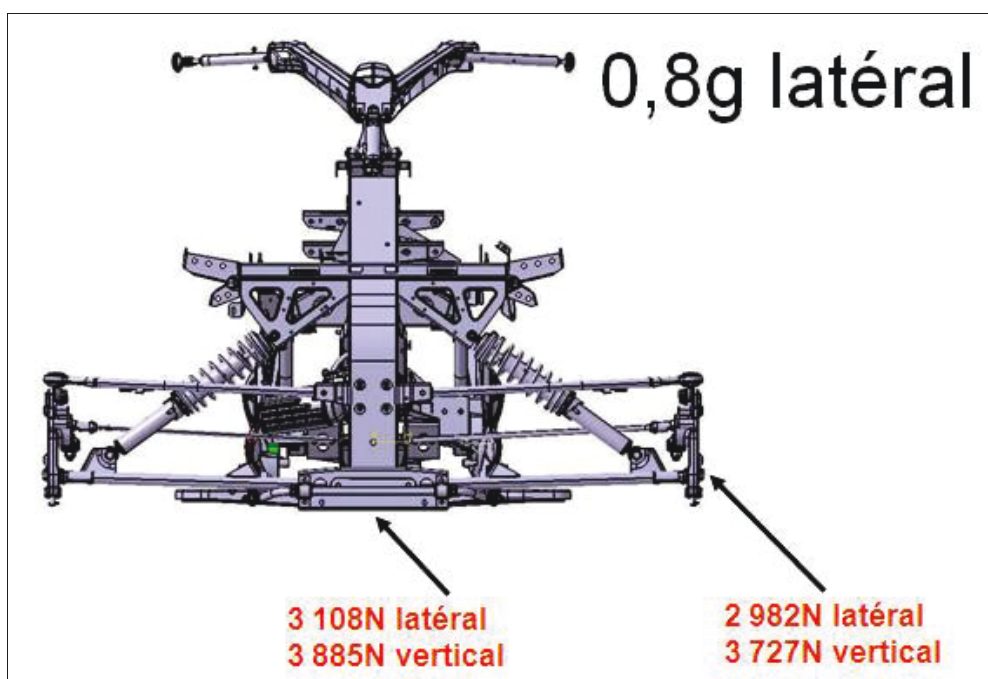


Figure 79: Approche de validation relative (spectre de cyclage latéral)

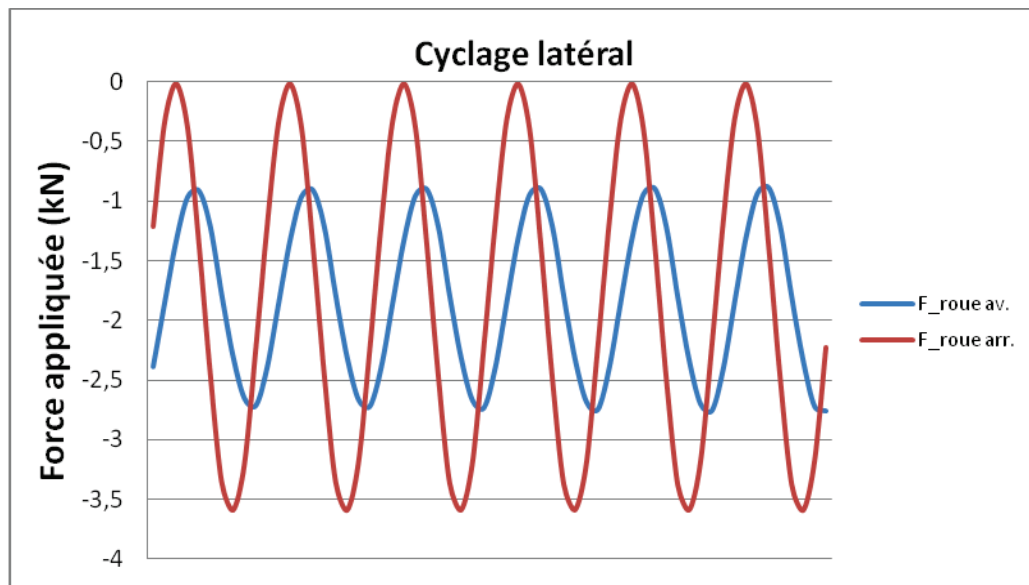


Figure 80: Variation des forces dans le spectre de cyclage latéral, effectué sur l'ensemble châssis-acier du tricycle (données de laboratoire)

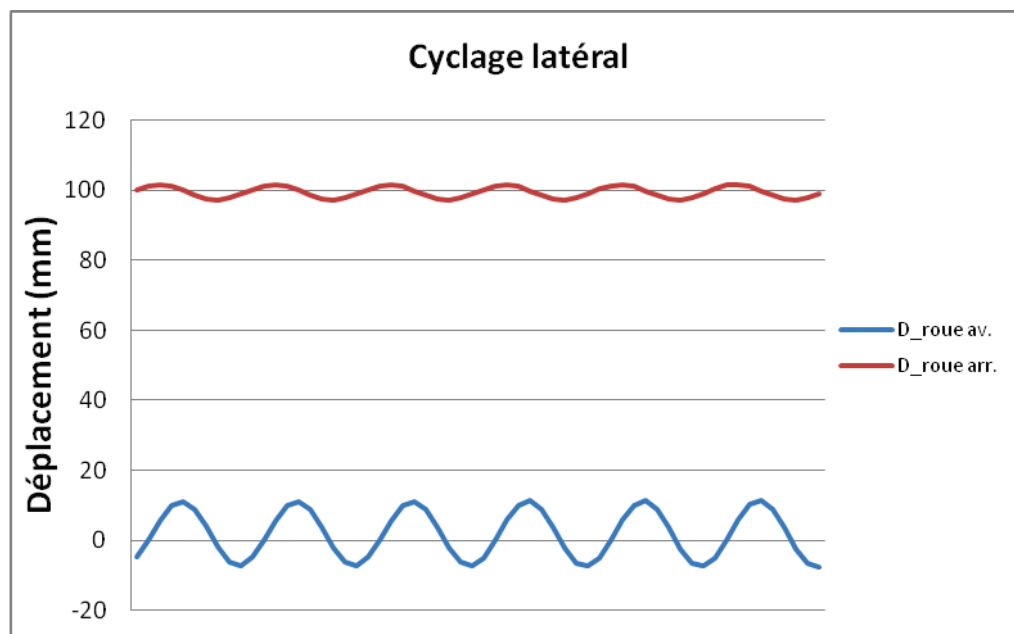


Figure 81: Variation des déplacements dans le spectre de cyclage latéral, effectué sur l'ensemble châssis-acier du tricycle (donnée de laboratoire)

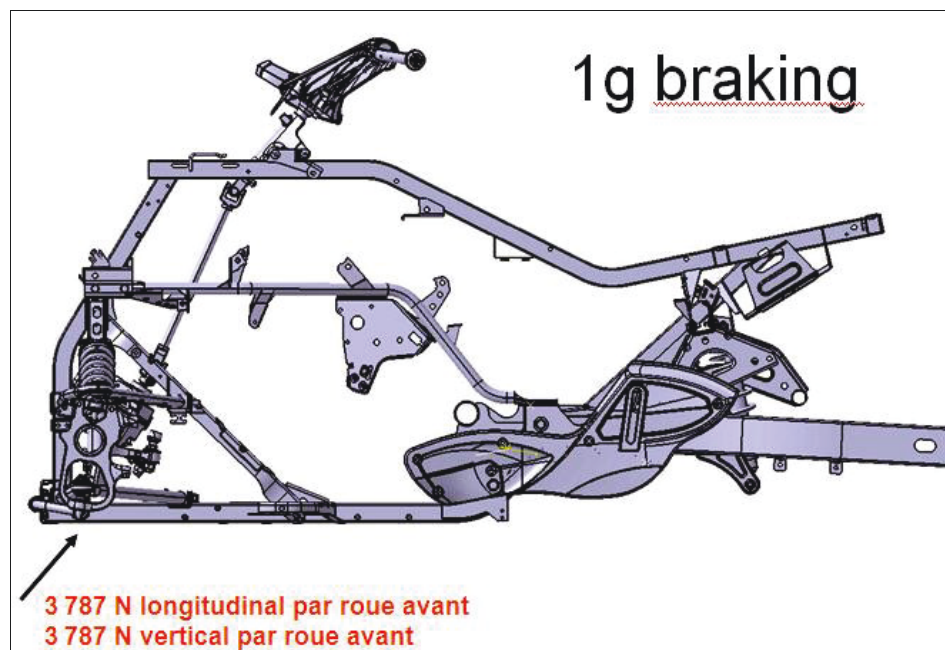


Figure 82: Approche de validation relative (spectre de cyclage en freinage)

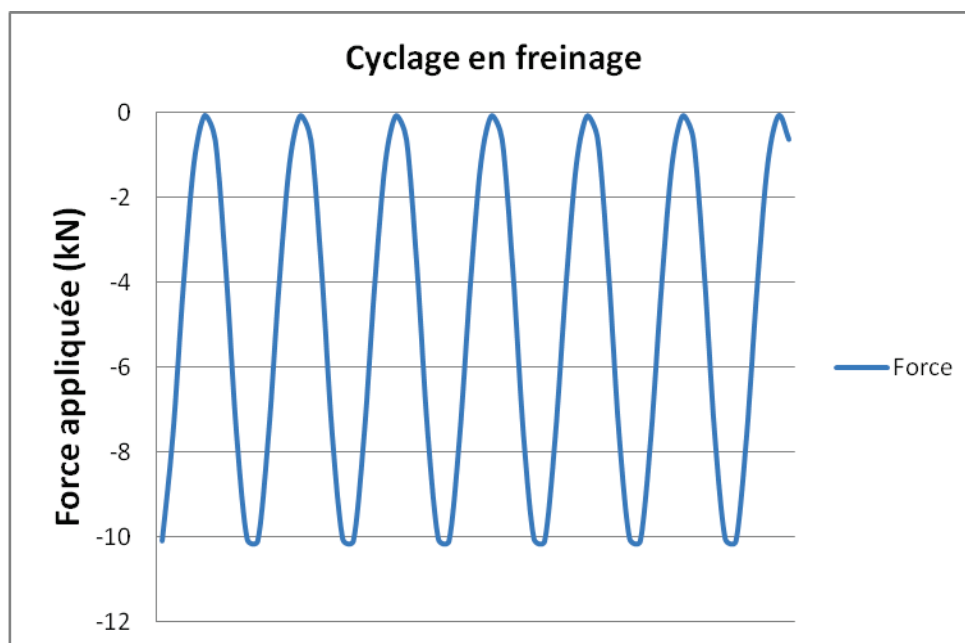
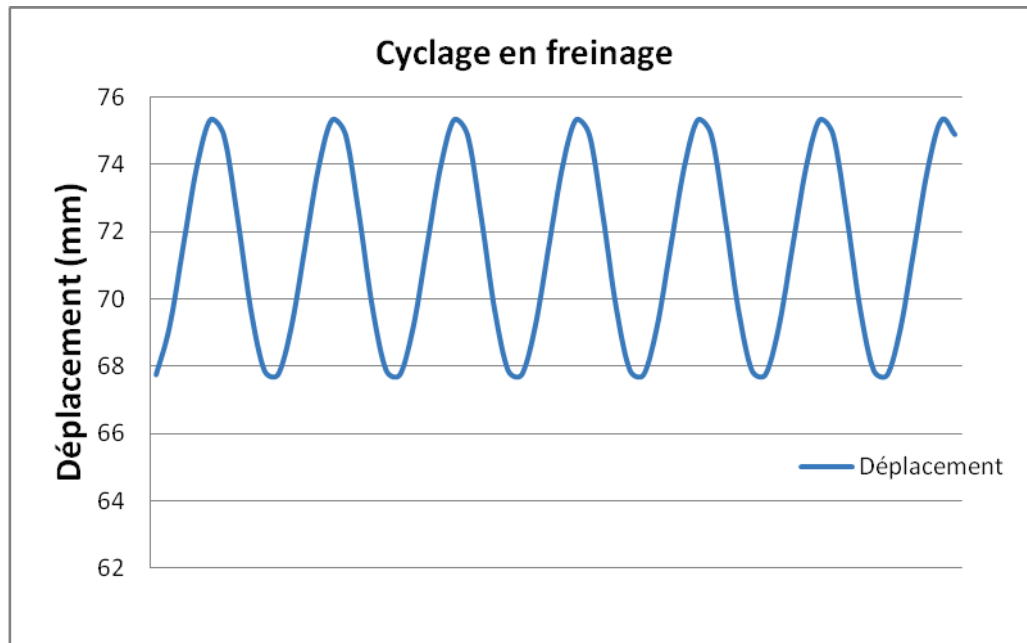


Figure 83: Variation de la force dans le spectre de cyclage en freinage, effectué sur l'ensemble châssis-acier du tricycle (données de laboratoire)





**Figure 84: Variation du déplacement dans le spectre de cyclage en freinage, effectué sur l'ensemble châssis-acier du tricycle (donnée de laboratoire)**

## ANNEXE C :

### Points de contrôle pour le cyclage du châssis de référence

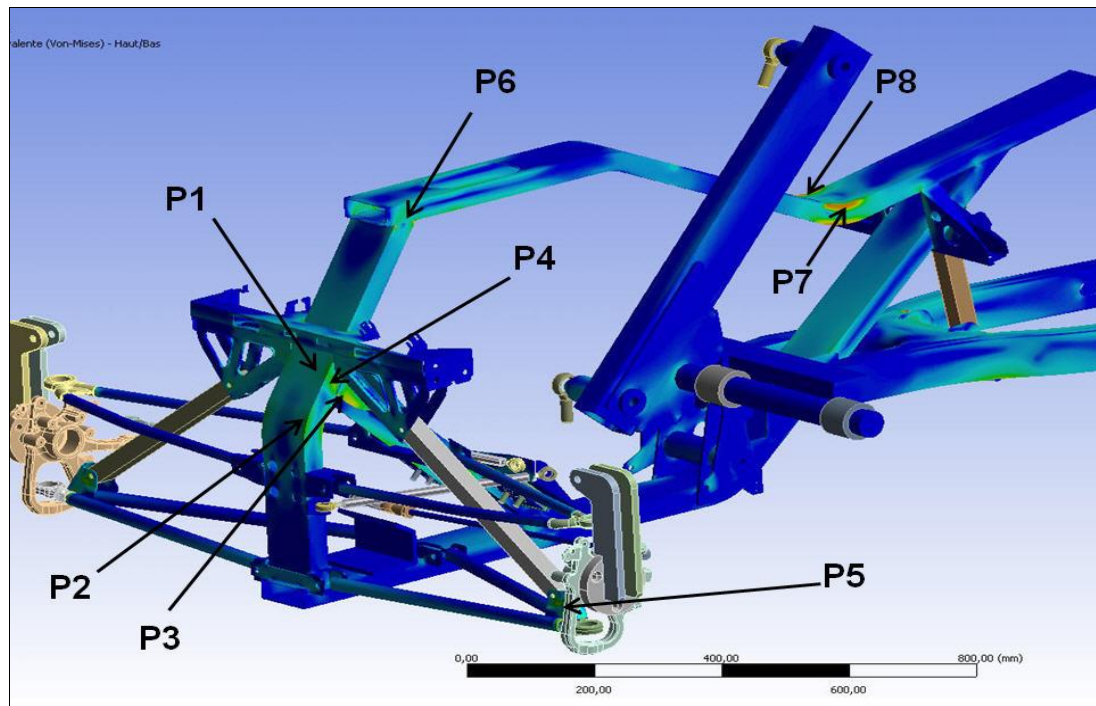


Figure 85: Cas de freinage (global)

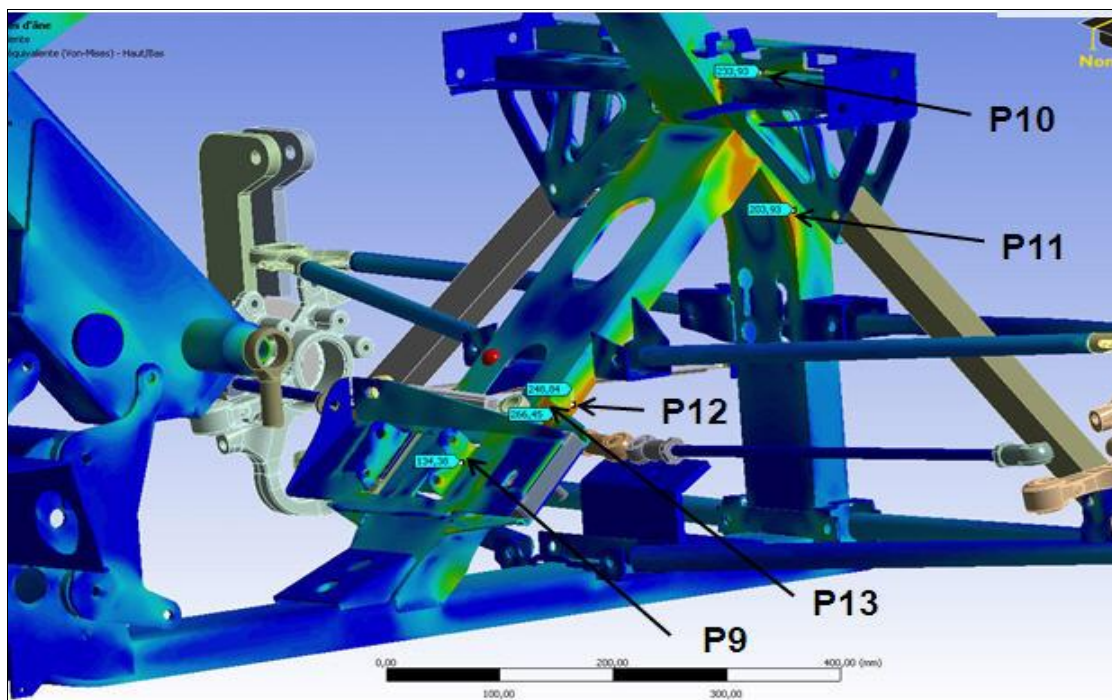


Figure 86: Cas de freinage + dos d'âne (châssis)

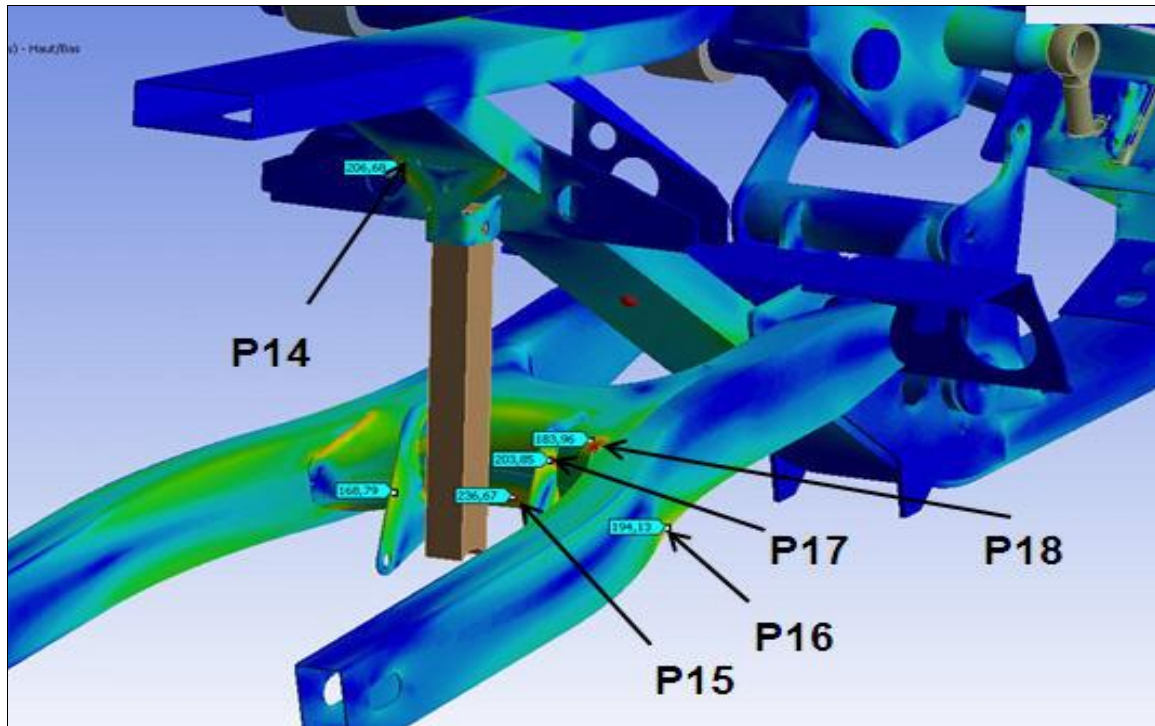


Figure 87: Cas de freinage + dos d'âne (bras de suspension arrière)

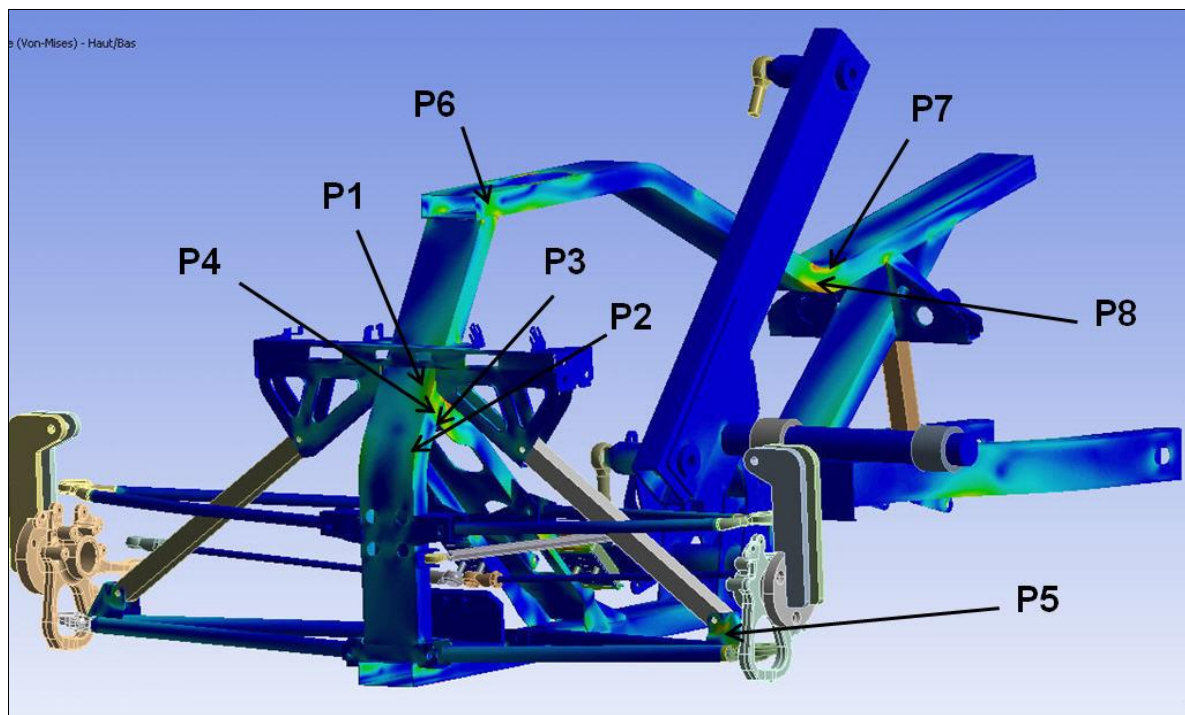


Figure 88: Cas de virage (global)



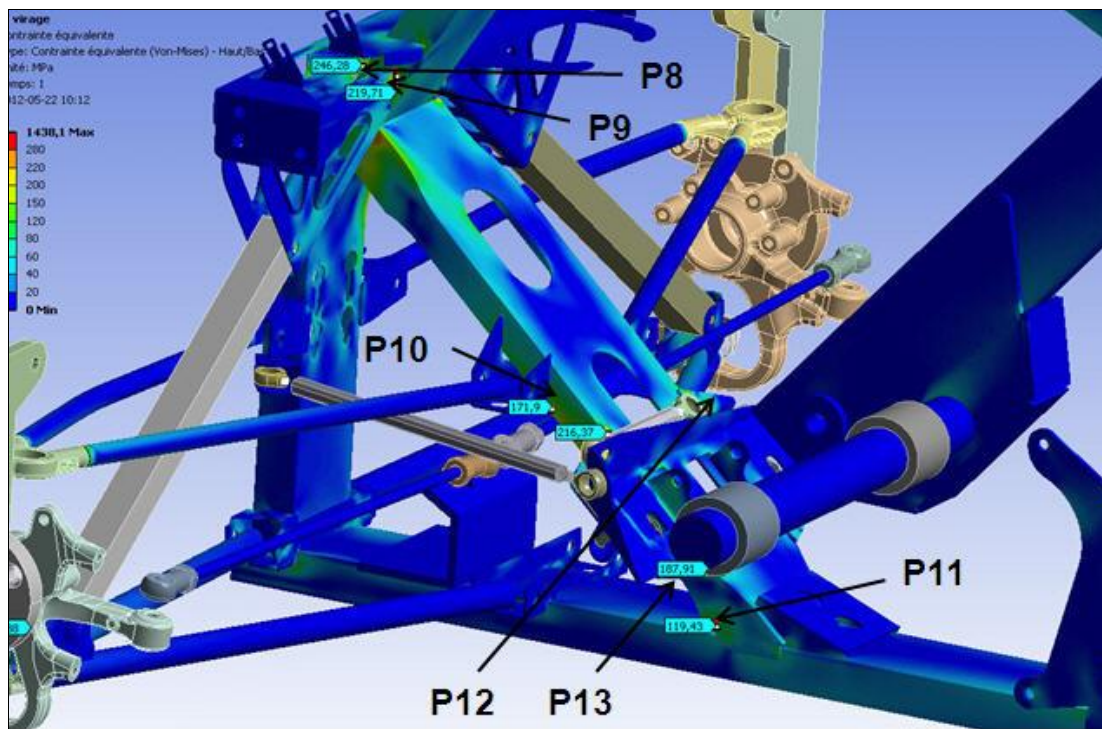


Figure 89: Cas de virage (châssis)

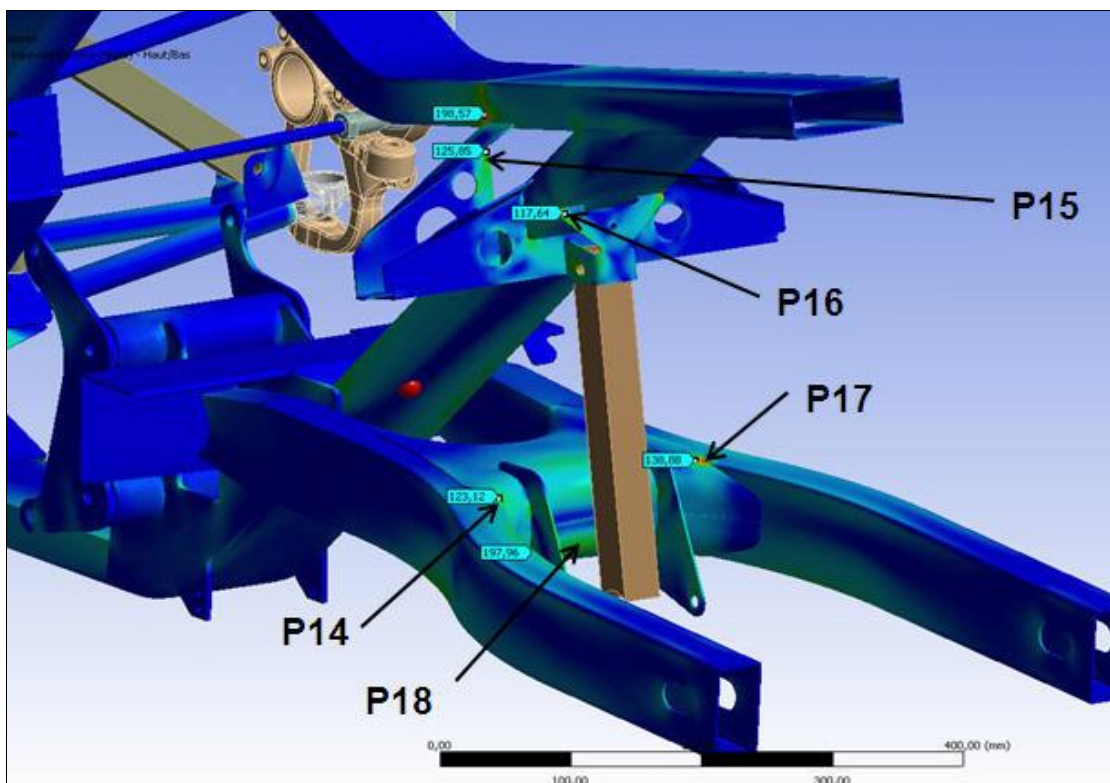


Figure 90: Cas de virage (bras de suspension arrière)

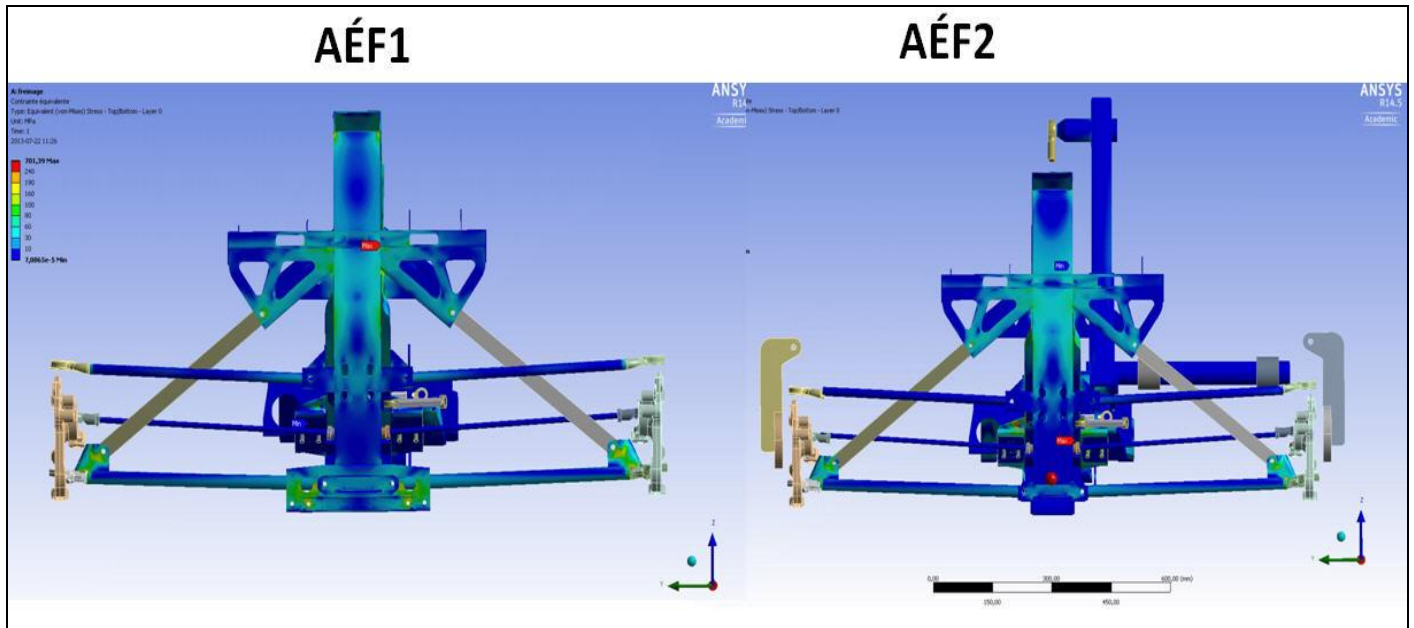


Figure 91: Corrélation entre les étapes de simulation par éléments finis (cas de freinage)

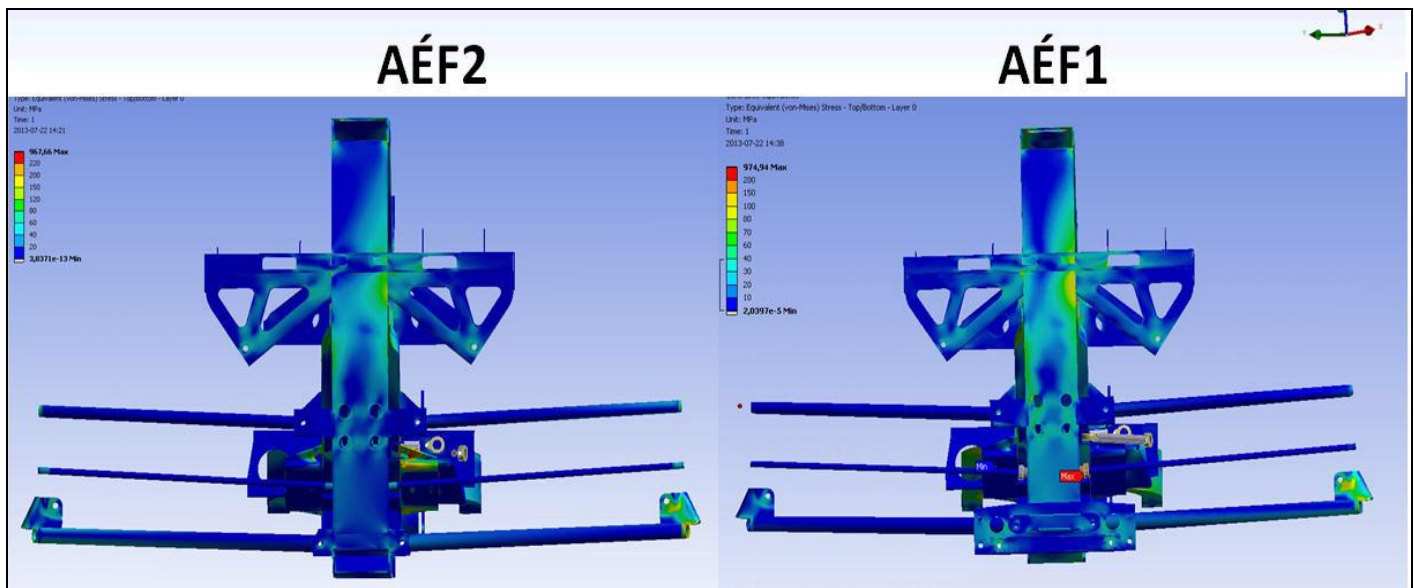


Figure 92: Corrélation entre les étapes de simulation par éléments finis (cas de virage)



## ANNEXE D:

Outils mis en place et paramètres identifiés et utilisés pour calculer la contrainte équivalente dans le point de contrôle suite aux tests physiques

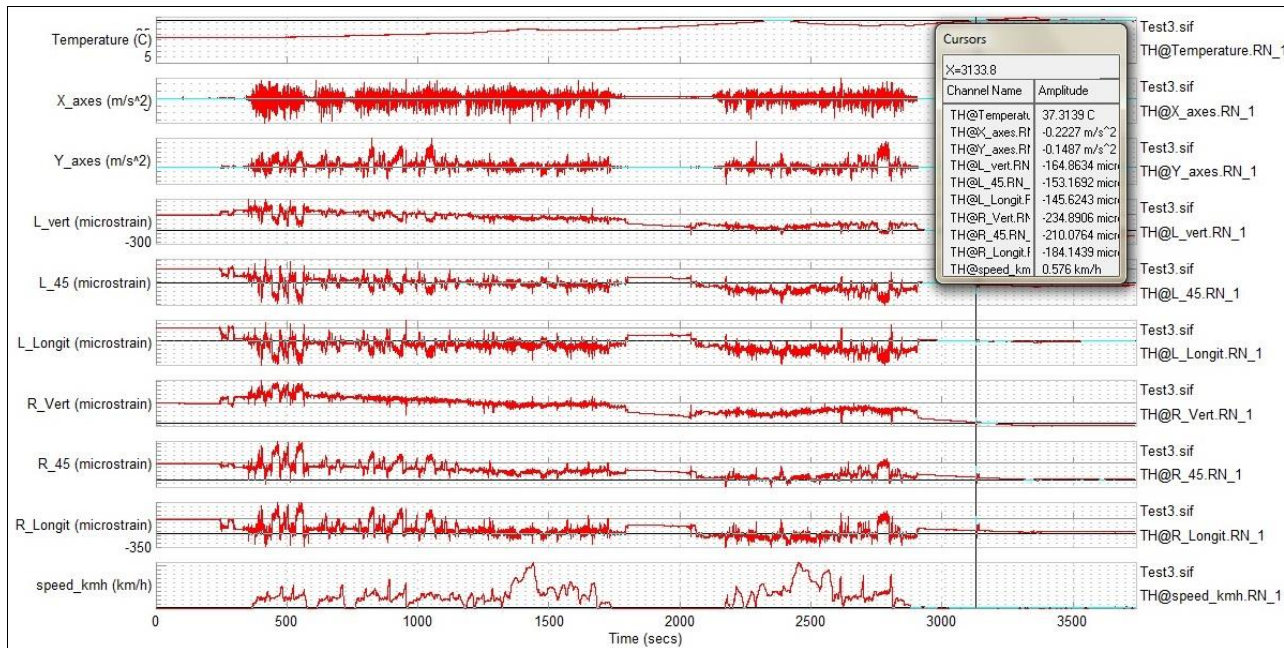


Figure 93: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 3

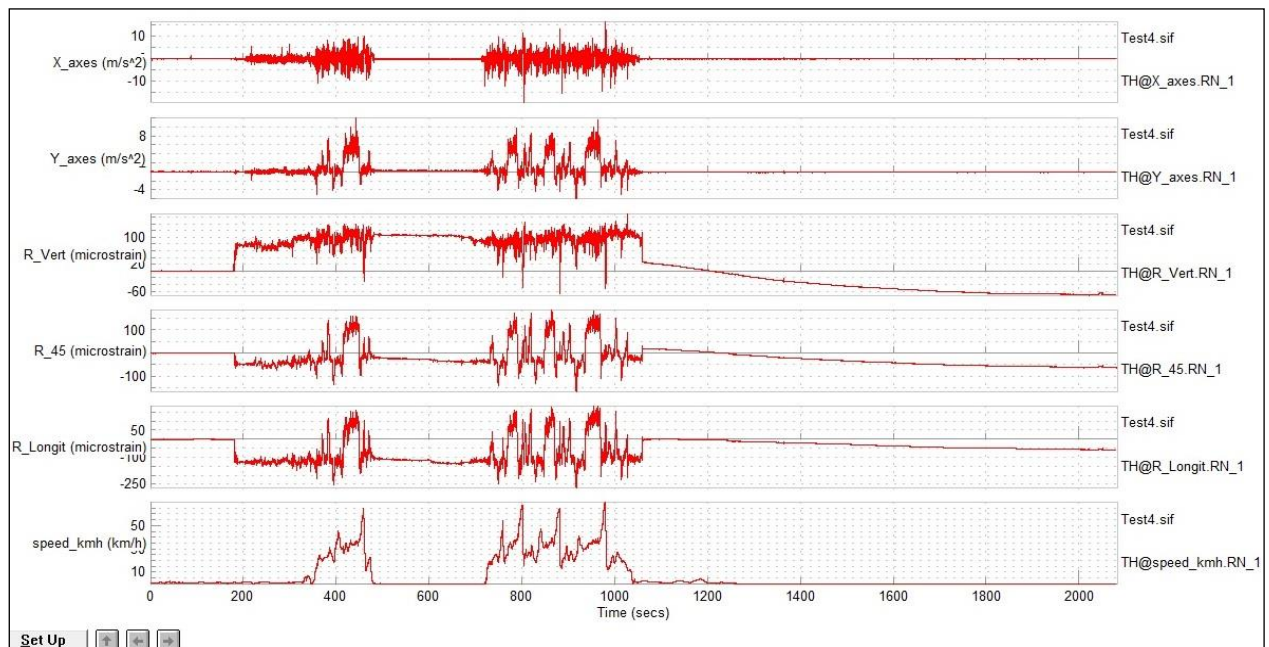


Figure 94: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 4 (rosette droite)

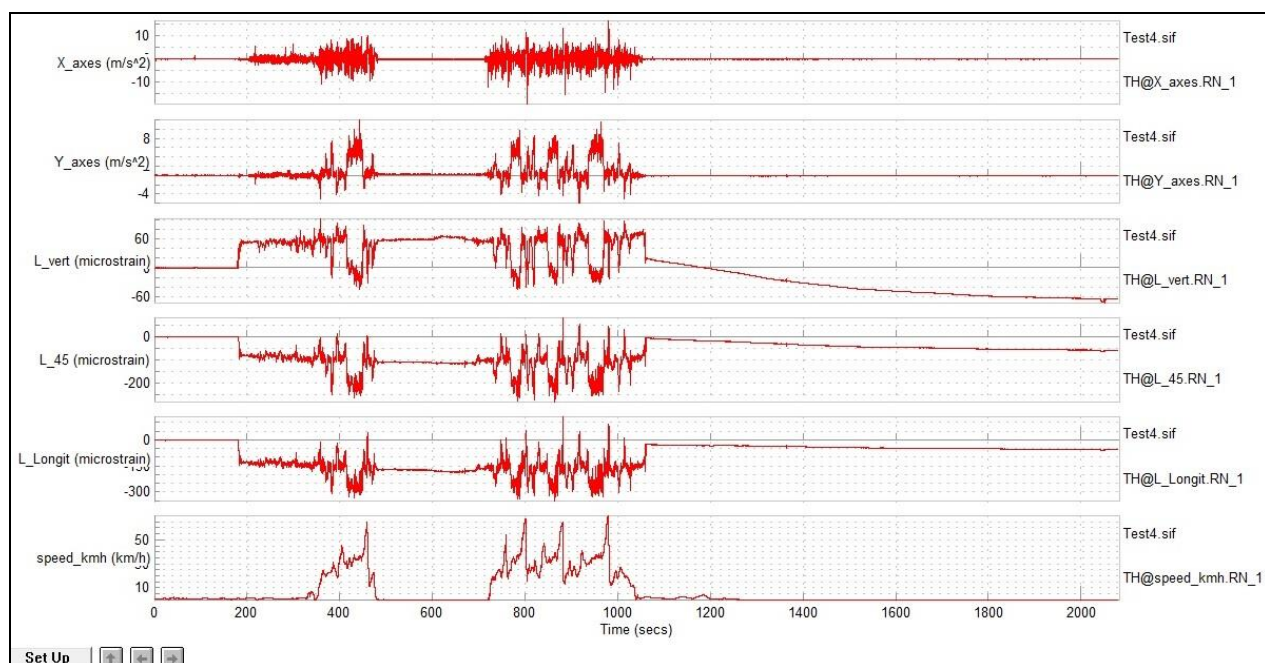


Figure 95: Les valeurs instantanées des paramètres pour le test 4 (rosette gauche)

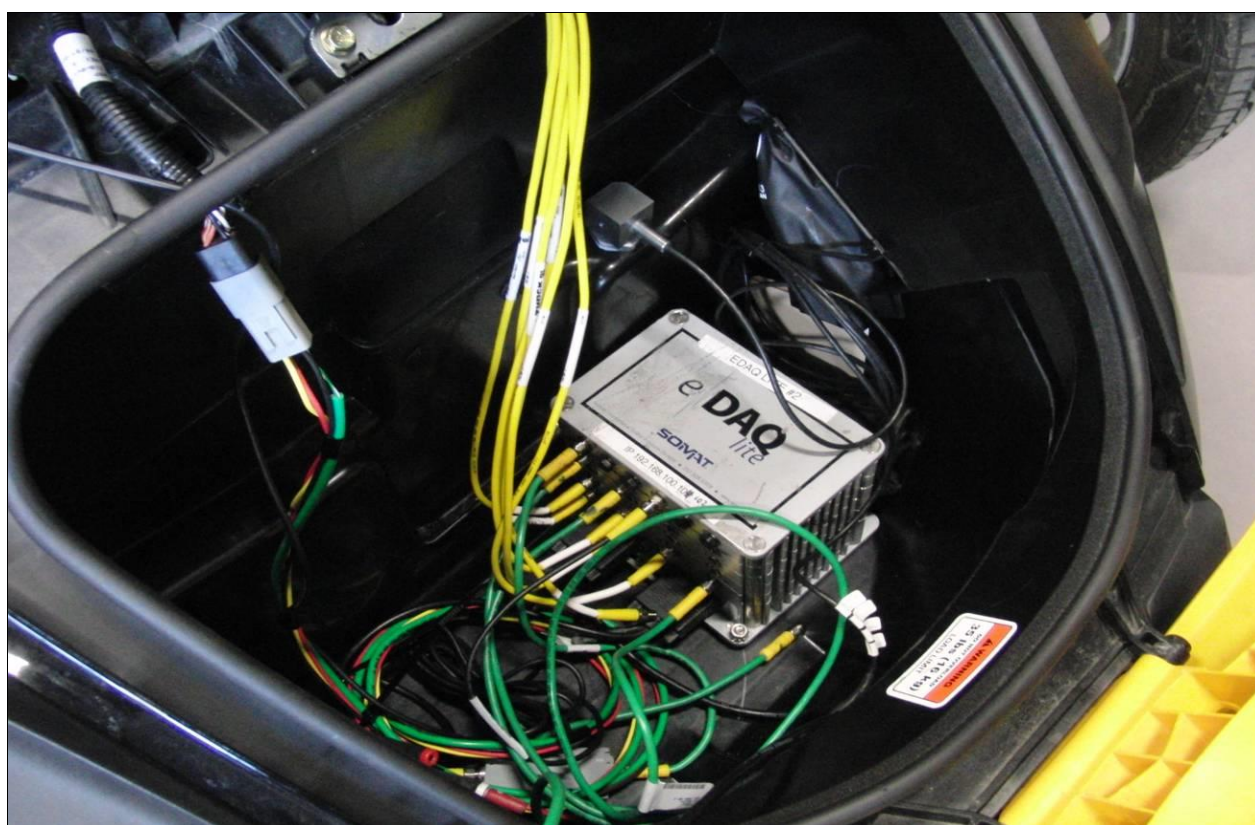


Figure 96: Le système d'acquisition des données instrumenté sur le véhicule de référence



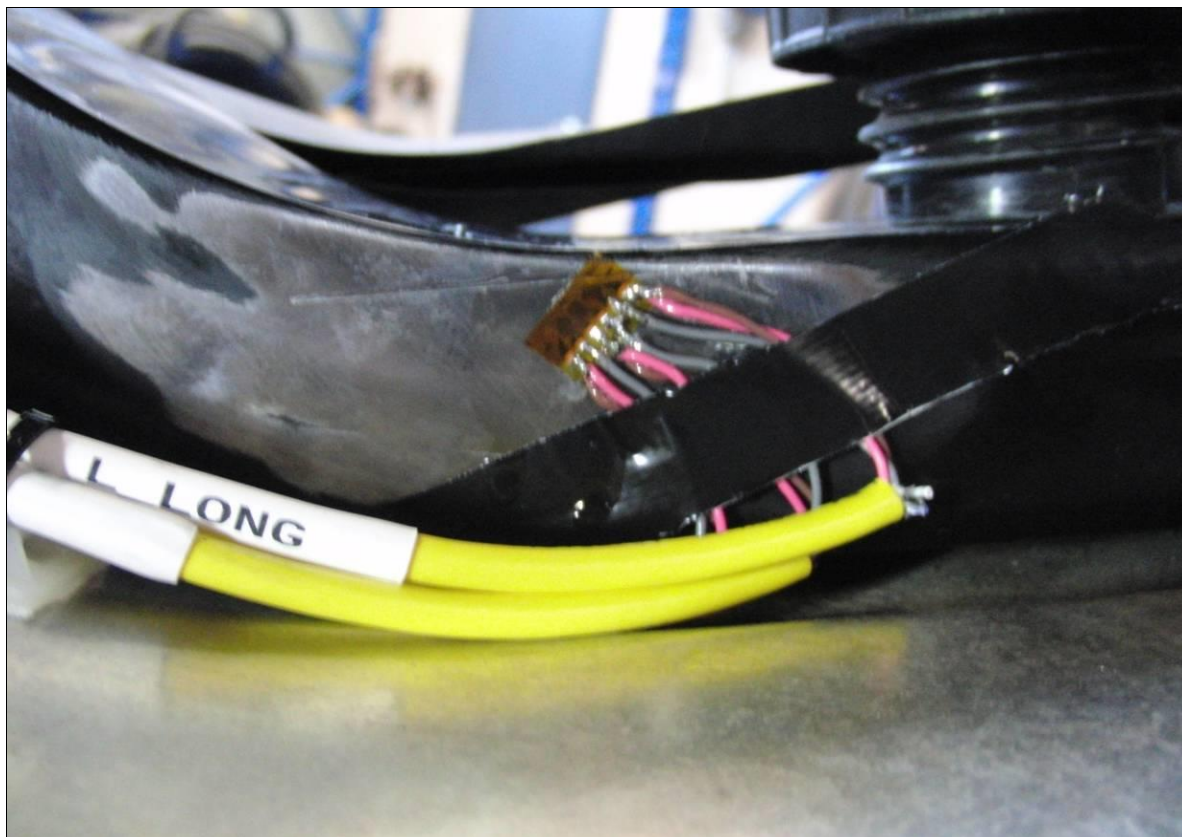


Figure 97: Jauge de déformation type «rosette» utilisée à la validation des chargements sur le véhicule de référence

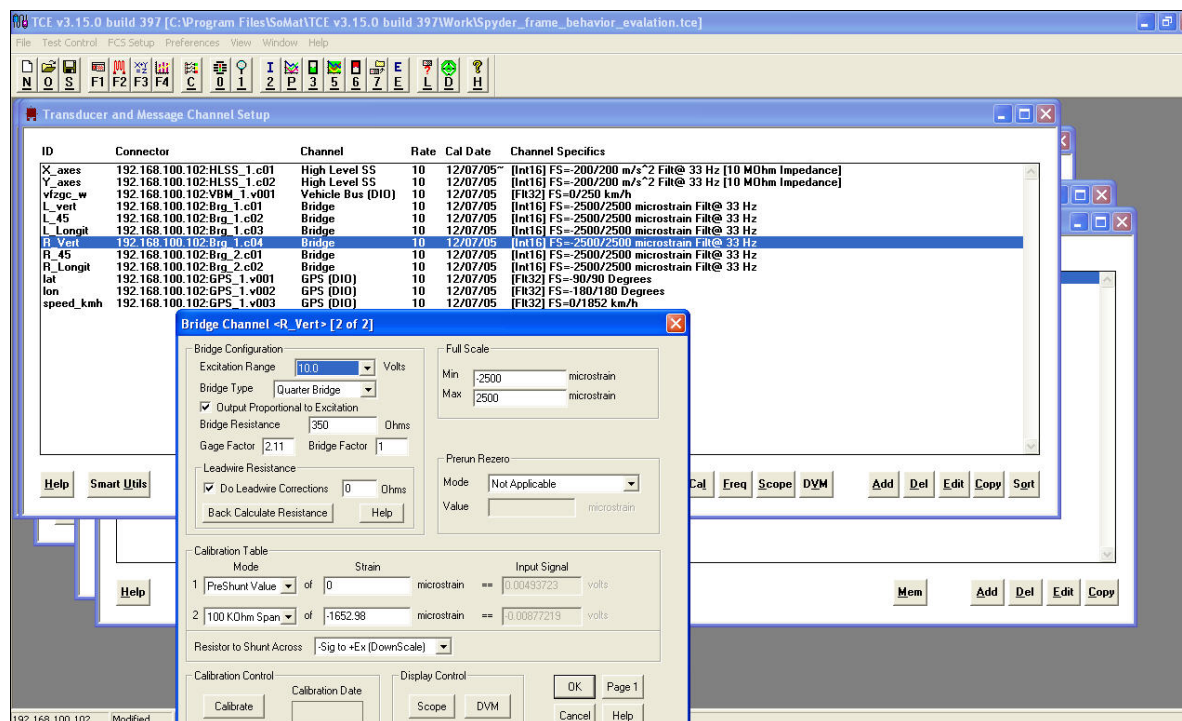


Figure 98: L'interface du logiciel TCE\_v3.15, utilisé pour l'acquisition des données sur le véhicule de référence



[illegible][illegible]

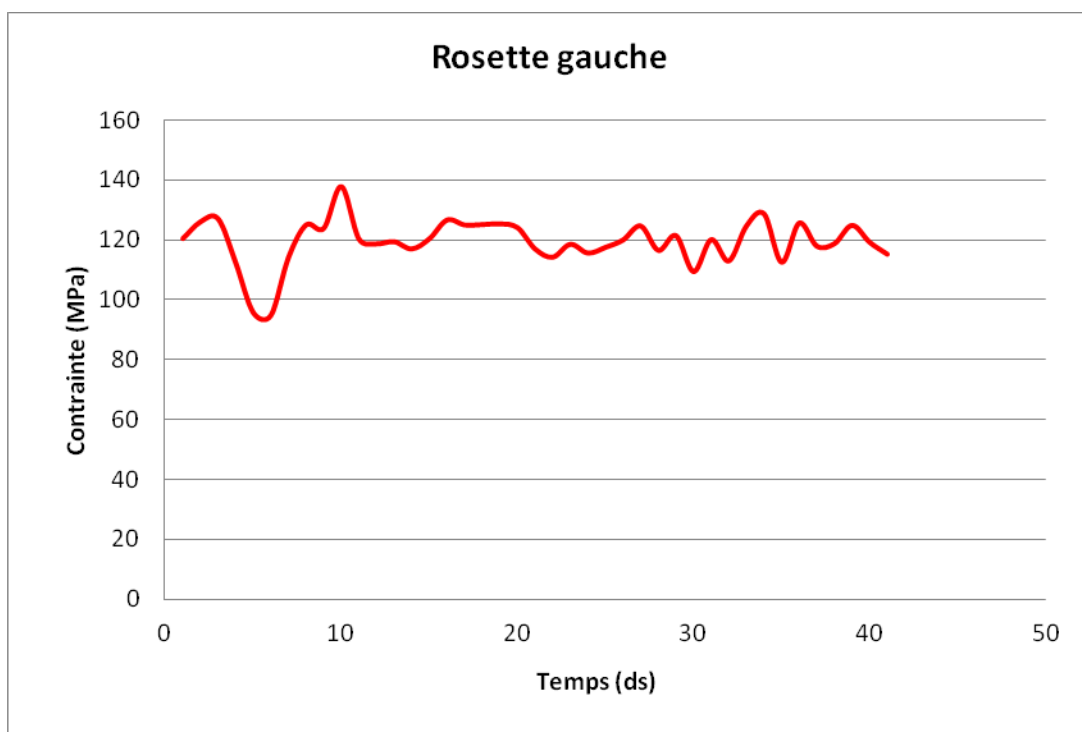


Figure 99: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage aux points P7

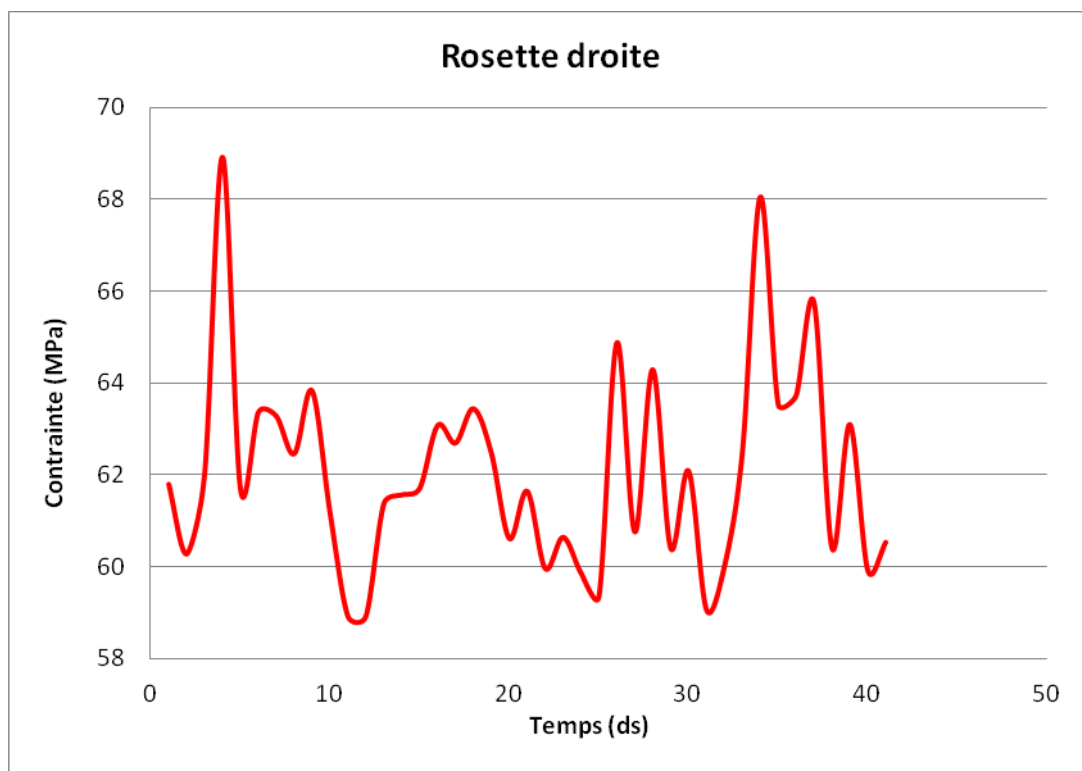


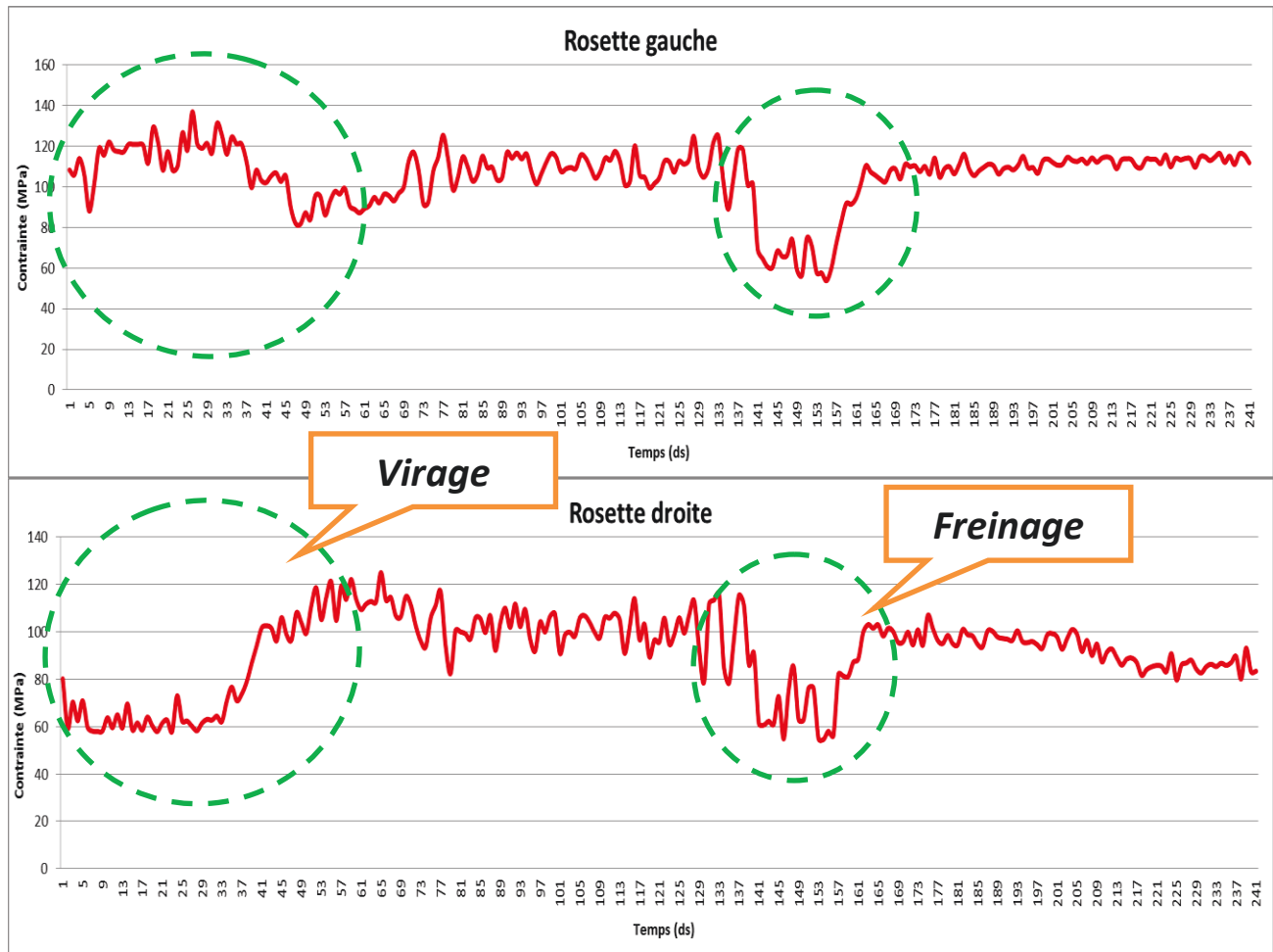
Figure 100: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage aux points P8

**Tableau 17: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un freinage, sur la jauge installée dans le point de contrôle P7**

| Rosette gauche | E       | u   | εa (0) vert. | εb (45) | εc (90) | εmax   | εmin   | εt    | θ(deg) | σmax  | σmin  | τmax | σalt | σmoye | σéq-a | σéq-m | σstat | σéq-CR | acc. X (m/s <sup>2</sup> ) |
|----------------|---------|-----|--------------|---------|---------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|----------------------------|
|                | 2,1E+11 | 0,3 | -29,863      | -196,2  | -236,2  | -12,08 | -294   | 241,9 | -44,79 | -16,6 | -48,5 | 32,6 | 15   | -32   | 58,34 | 64,83 | 50    | 108,3  | 1,6                        |
| 988            | 2,1E+11 | 0,3 | 37,8578      | -138,9  | -196,6  | 52,10  | -259,9 | 263   | -44,75 | -2,1  | -36,8 | 35,4 | 17   | -19   | 63,59 | 64,16 | 50    | 113,6  | 1,2                        |
| 988.1          | 2,1E+11 | 0,3 | 40,0843      | -137    | -193    | 54,89  | -256,2 | 262,7 | -44,75 | -1,4  | -36,0 | 35,3 | 17   | -18   | 63,54 | 63,81 | 50    | 113,5  | 0,4                        |
| 988.2          | 2,1E+11 | 0,3 | 36,9301      | -134,8  | -188,9  | 51,33  | -250,2 | 254,7 | -44,75 | -1,8  | -35,4 | 34,3 | 16   | -18   | 61,47 | 62,02 | 50    | 111,5  | -2,3                       |
| 988.3          | 2,1E+11 | 0,3 | 40,0843      | -142,2  | -205,1  | 53,85  | -270,9 | 272,7 | -44,75 | -2,2  | -38,2 | 36,7 | 17   | -20   | 65,79 | 66,63 | 50    | 115,8  | -0,3                       |
| 988.4          | 2,1E+11 | 0,3 | 36,4663      | -131,4  | -181,7  | 51,29  | -241,2 | 247,9 | -44,75 | -1,4  | -34,1 | 33,3 | 16   | -17   | 59,94 | 60,21 | 50    | 109,9  | -0,1                       |
| 988.5          | 2,1E+11 | 0,3 | 37,4867      | -140,6  | -199,6  | 51,56  | -263,6 | 265,3 | -44,75 | -2,4  | -37,3 | 35,7 | 17   | -19   | 64,12 | 64,68 | 50    | 114,1  | -0,4                       |
| 988.6          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,8987      | -135,8  | -194,3  | 53,72  | -257,4 | 261,8 | -44,74 | -1,6  | -36,2 | 35,2 | 17   | -18   | 63,35 | 63,62 | 50    | 113,3  | 1,3                        |
| 988.7          | 2,1E+11 | 0,3 | 38,5072      | -138,3  | -200,1  | 51,65  | -264,1 | 264,9 | -44,74 | -2,3  | -37,3 | 35,6 | 17   | -19   | 64,04 | 64,6  | 50    | 114    | 1,3                        |
| 988.8          | 2,1E+11 | 0,3 | 38,1361      | -140,2  | -196,2  | 53,12  | -259,8 | 264,4 | -44,76 | -1,9  | -36,8 | 35,6 | 17   | -19   | 63,91 | 64,47 | 50    | 113,9  | -1,1                       |
| 988.9          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,6204      | -127,3  | -178,3  | 54,05  | -237,6 | 246,8 | -44,74 | -0,7  | -33,3 | 33,2 | 16   | -16   | 59,7  | 59,7  | 50    | 109,7  | -0,4                       |
| 989            | 2,1E+11 | 0,3 | 42,2179      | -138,4  | -196,3  | 57,08  | -260,9 | 268,3 | -44,76 | -1,2  | -36,6 | 36,1 | 17   | -18   | 64,79 | 65,06 | 50    | 114,8  | -0,5                       |
| 989.1          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,2493      | -141,9  | -199,5  | 54,27  | -264,1 | 268,8 | -44,76 | -1,9  | -37,3 | 36,2 | 17   | -19   | 64,9  | 65,45 | 50    | 114,9  | -1,5                       |
| 989.2          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,6204      | -135,4  | -192    | 53,87  | -254,6 | 260,1 | -44,75 | -1,5  | -35,8 | 35,0 | 17   | -18   | 62,96 | 63,24 | 50    | 113    | 0,7                        |
| 989.3          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,4349      | -140,9  | -198,7  | 54,27  | -263,2 | 267,8 | -44,76 | -1,8  | -37,2 | 36,0 | 17   | -19   | 64,69 | 65,25 | 50    | 114,7  | 0,1                        |
| 989.4          | 2,1E+11 | 0,3 | 40,9192      | -143,6  | -204,5  | 55,62  | -270,6 | 274,8 | -44,76 | -1,9  | -38,1 | 37,0 | 18   | -20   | 66,52 | 67,09 | 50    | 116,5  | -0,4                       |
| 989.5          | 2,1E+11 | 0,3 | 37,4867      | -135,1  | -193,1  | 50,94  | -255,2 | 257,5 | -44,74 | -2,1  | -36,0 | 34,6 | 16   | -19   | 62,1  | 62,94 | 50    | 112,1  | 0,2                        |
| 989.6          | 2,1E+11 | 0,3 | 38,8783      | -141,2  | -204,5  | 52,15  | -269,8 | 270   | -44,74 | -2,5  | -38,1 | 36,3 | 17   | -20   | 65,17 | 66,02 | 50    | 115,2  | 0,5                        |
| 989.7          | 2,1E+11 | 0,3 | 38,5072      | -133,1  | -183,1  | 54,07  | -243,7 | 252,8 | -44,75 | -1,0  | -34,4 | 34,0 | 16   | -17   | 61,04 | 61,31 | 50    | 111    | -1,6                       |
| 989.8          | 2,1E+11 | 0,3 | 40,6409      | -141,5  | -206,9  | 53,71  | -273,1 | 273,6 | -44,74 | -2,3  | -38,4 | 36,8 | 18   | -20   | 66,26 | 66,84 | 50    | 116,3  | 1,0                        |
| 989.9          | 2,1E+11 | 0,3 | 39,9915      | -144,1  | -200,3  | 55,93  | -265,6 | 272,2 | -44,77 | -1,7  | -37,6 | 36,6 | 17   | -19   | 65,67 | 66,21 | 50    | 115,7  | -0,5                       |
| 990            | 2,1E+11 | 0,3 | 39,5276      | -134,4  | -186,3  | 54,92  | -247,9 | 256,7 | -44,76 | -1,1  | -34,9 | 34,5 | 16   | -17   | 61,92 | 62,19 | 50    | 111,9  | -1,8                       |
|                |         |     |              |         |         |        |        |       |        |       |       |      |      |       |       |       | Max.  | 125,5  |                            |

**Tableau 18: Calcul de la contrainte équivalente complètement renversée dans un freinage, pour la jauge installée dans le point de contrôle P8**

| Rosette droite | E       | u   | ea (0) vert. | eb (45) | ec (90) | emax   | emin   | et    | θ      | σ <sub>max</sub> | σ <sub>min</sub> | τ <sub>max</sub> | σ <sub>alt</sub> | σ <sub>moye</sub> | σ <sub>eq-a</sub> | σ <sub>eq-m</sub> | σ <sub>stat</sub> | σ <sub>eq-CR</sub> | acc. X (m/s <sup>2</sup> ) |
|----------------|---------|-----|--------------|---------|---------|--------|--------|-------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
|                | 2,1E+11 | 0,3 | 74,2802      | 160     | 181,53  | 190,39 | 111,43 | 125   | 44,536 | 39,6             | 23,1             | 16,8             | 8                | 31                | 30,2              | 42,53             | 50                | 80,2               | 1,6                        |
| 988.1          | 2,1E+11 | 0,3 | 113,248      | 29,88   | -32,7   | 113,98 | -72,49 | 147,4 | -43,6  | 19,6             | 0,1              | 19,8             | 9                | 9                 | 35,51             | 35,51             | 50                | 85,51              | 0,4                        |
| 988.2          | 2,1E+11 | 0,3 | 109,2679     | 31,54   | -26,67  | 109,97 | -63,72 | 137,3 | -43,52 | 19,2             | 1,1              | 18,5             | 9                | 10                | 33,25             | 33,53             | 50                | 83,25              | -2,3                       |
| 988.3          | 2,1E+11 | 0,3 | 121,3932     | 27,58   | -46,05  | 122    | -92,06 | 168,7 | -43,55 | 20,3             | -1,9             | 22,7             | 11               | 9                 | 40,82             | 40,32             | 50                | 90,82              | -0,3                       |
| 988.4          | 2,1E+11 | 0,3 | 103,7143     | 34,12   | -17,77  | 104,36 | -50,85 | 122,8 | -43,37 | 18,6             | 2,4              | 16,5             | 8                | 10                | 29,71             | 30,31             | 50                | 79,71              | -0,1                       |
| 988.5          | 2,1E+11 | 0,3 | 115,2843     | 33,01   | -33,63  | 115,69 | -74,79 | 149,7 | -43,14 | 19,9             | 0,1              | 20,1             | 9                | 9                 | 36,04             | 36,04             | 50                | 86,04              | -0,4                       |
| 988.6          | 2,1E+11 | 0,3 | 114,1736     | 28,87   | -36,96  | 114,8  | -78,37 | 152,4 | -43,51 | 19,5             | -0,6             | 20,5             | 10               | 9                 | 36,89             | 36,64             | 50                | 86,89              | 1,3                        |
| 988.7          | 2,1E+11 | 0,3 | 117,4132     | 31,17   | -39,37  | 117,81 | -82,8  | 157,6 | -43,14 | 19,9             | -0,8             | 21,2             | 10               | 9                 | 38,06             | 37,81             | 50                | 88,06              | 1,3                        |
| 988.8          | 2,1E+11 | 0,3 | 112,8777     | 33,65   | -27,88  | 113,43 | -66,48 | 141,9 | -43,36 | 19,8             | 1,1              | 19,1             | 9                | 10                | 34,26             | 34,54             | 50                | 84,26              | -1,1                       |
| 988.9          | 2,1E+11 | 0,3 | 104,9176     | 26,01   | -29,08  | 105,97 | -65,22 | 136,1 | -43,78 | 18,3             | 0,3              | 18,3             | 8                | 9                 | 32,71             | 32,97             | 50                | 82,71              | -0,4                       |
| 989            | 2,1E+11 | 0,3 | 112,8777     | 30,98   | -32,7   | 113,44 | -72,63 | 146,7 | -43,4  | 19,5             | 0,1              | 19,7             | 9                | 9                 | 35,36             | 35,36             | 50                | 85,36              | -0,5                       |
| 989.1          | 2,1E+11 | 0,3 | 115,1917     | 30,43   | -34,74  | 115,83 | -75,78 | 151,2 | -43,52 | 19,8             | -0,1             | 20,3             | 9                | 9                 | 36,37             | 36,37             | 50                | 86,37              | -1,5                       |
| 989.2          | 2,1E+11 | 0,3 | 112,1372     | 29,6    | -33,35  | 112,79 | -73,12 | 146,8 | -43,52 | 19,3             | 0,0              | 19,8             | 9                | 9                 | 35,37             | 35,37             | 50                | 85,37              | 0,7                        |
| 989.3          | 2,1E+11 | 0,3 | 115,2843     | 31,26   | -35,76  | 115,76 | -77,39 | 152   | -43,29 | 19,8             | -0,3             | 20,5             | 10               | 9                 | 36,81             | 36,55             | 50                | 86,81              | 0,1                        |
| 989.4          | 2,1E+11 | 0,3 | 116,7652     | 33,47   | -31,21  | 117,35 | -71,8  | 149,1 | -43,44 | 20,3             | 0,6              | 20,1             | 9                | 10                | 35,9              | 36,17             | 50                | 85,9               | -0,4                       |
| 989.5          | 2,1E+11 | 0,3 | 113,1554     | 27,39   | -38,54  | 113,8  | -80,07 | 153   | -43,53 | 19,2             | -1,0             | 20,6             | 10               | 9                 | 37,03             | 36,77             | 50                | 87,03              | 0,2                        |
| 989.6          | 2,1E+11 | 0,3 | 119,4495     | 28,13   | -44,01  | 120,01 | -88,98 | 164,6 | -43,48 | 20,1             | -1,6             | 22,1             | 10               | 9                 | 39,64             | 39,4              | 50                | 89,64              | 0,5                        |
| 989.7          | 2,1E+11 | 0,3 | 104,6399     | 33,75   | -18,51  | 105,34 | -51,99 | 124,6 | -43,45 | 18,8             | 2,3              | 16,8             | 8                | 10                | 30,11             | 30,7              | 50                | 80,11              | -1,6                       |
| 989.8          | 2,1E+11 | 0,3 | 123,4296     | 23,9    | -54,4   | 124,06 | -103,3 | 179,1 | -43,62 | 20,3             | -3,4             | 24,1             | 11               | 8                 | 43,16             | 42,5              | 50                | 93,16              | 1,0                        |
| 989.9          | 2,1E+11 | 0,3 | 113,331      | 35,31   | -22,59  | 114,07 | -59,58 | 137,4 | -43,56 | 20,2             | 2,1              | 18,5             | 9                | 11                | 33,26             | 33,86             | 50                | 83,26              | -0,5                       |
| 990            | 2,1E+11 | 0,3 | 107,2316     | 29,51   | -29,64  | 107,86 | -67,04 | 138,1 | -43,44 | 18,6             | 0,4              | 18,6             | 9                | 9                 | 33,42             | 33,42             | 50                | 83,42              | -1,8                       |
|                |         |     |              |         |         |        |        |       |        |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   | Max               | 125,1              |                            |



**Figure 101: Représentation graphique de la contrainte équivalente dans un virage et un freinage aux points P7 (gauche) et P8 (droite)**

## ANNEXE E: Article 4

### Avant-propos

#### **Auteurs et affiliation :**

C. Iorga : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique;

A. Desrochers : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date d'acceptation :** 20 déc. 2012

**Revue :** European Scientific Journal

#### **Références :**

7) [Jones C. and Ertas A. (1993)]; 2) [Otto K. and Wood K. (2001)]; 11) [Boothroyd G. (2002)]; 6) [Cooper G. Robert (1993)]; 79) [Iorga C. and Desrochers A., (2011)]; 38) [Maropoulos P.G., Ceglarek D. (2010)]; 3) [Dym C. and Little P. (2009)]; 37) [East W., Kirby J., Liu L., (2008)]; 80) [Ertas A. and al. (1989)]; 23) [Vanderlaan J., Doyle T. (2009)]; 21) [Seider, Warren, D. (2009)]; 42) [Lemay É. (1995)]; 49) [Kuo T-C, Huang SH, Zhang SH (2001)]; 59) [Pandey V., Thurston D. (2008)]; 62) [Pépin J.-F. (2008)].

**Titre français :** Méthodologies de conception et validation adaptables à divers contextes de développement des produits

#### **Contributions au document :**

Cet article contribue à la thèse en élaborant une approche théorique sur les critères de conception, sur les types de produits et sur les méthodologies de conception et validation de produits. En fonction du contexte de développement de produits (ex. : nouveau produit, évolution d'un produit existant où conception d'adaptation), ces approches théoriques sous forme des méthodologies de conception et validation seront appliquées au développement des produits et composants structuraux dans l'industrie des produits récréatifs.

## Résumé français:

*La conception technique peut être stimulante, ou elle peut être ardue, difficile et improductive, si les méthodes de validation des concepts développés ne sont pas liées aux besoins des clients et aux spécifications du produit. Les incertitudes et la variabilité existent toujours dans les estimations effectuées durant les étapes de conception. Les chargements varient et sont souvent mal connus, les limites admissibles sont parfois peu connues pour certains modes de défaillance, raison pour laquelle d'autres incertitudes peuvent résulter, causées par les variations dans la qualité de fabrication, dans les conditions de fonctionnement ou dans les procédures de maintenance. L'un des objectifs de ce document est de présenter des méthodologies qui mettent en lumière les défis de la conception et de la validation des produits et qui permettront aux concepteurs de se concentrer sur le développement d'une solution créative, efficace et rentable. Un autre objectif de cet article est d'intégrer l'optimisation et la validation de produit à la phase de conception détaillée.*

## GENERIC PRODUCT DESIGN & VALIDATION METHODOLOGIES AT THE DETAILED DESIGN STAGE

**Iorga Cristian** (P.eng., M.Sc.) ; **Desrochers Alain** (P.eng., Ph.D.)

Université de Sherbrooke (QC), Canada

---

## Abstract:

Doing design is to imagine and specify things that don't exist, with the scope of modeling them and bringing them into the world. The «things» may be palpable-machines, buildings and bridges; they may be procedures-design methodologies for an organization or protocols for a manufacturing process, or for solving a scientific research problem by experiment; they also may be works of art-painting, lyrics, music or sculpture. Engineering design can be challenging and exciting, or it can be taxing, difficult and unproductive if the validation methods of the product are not linked to the client needs and to the product specifications. Uncertainties and variability always exist in design predictions. Loads are often variable and inaccurately known, strengths are variable and sometimes inaccurately known for certain failure modes or certain states of stress and other uncertainties may result from variations in the quality of manufacture, operation conditions or maintenance practices.

One of the objectives of this paper is to outline a methodology that highlights the exciting challenges of product design and allows both engineers and students to focus on the development of a creative, effective and profitable solution. Another challenging goal of this

paper would be to integrate **design optimization** and **design validation** at the detailed design phase in the product development process. Detailed design involves interactions between three elements: **geometry**, **materials** and **loads**. In this context, links between these elements will be formalized in terms of design methodologies. The optimization process allows finding one or more combinations of parameters maximizing or minimizing a given design criterion, while the validation activities provide feedback to the designers in order to verify the calculations accuracy and the achievement of all design criteria. To provide safe, reliable operation in the face of these variations and uncertainties, it is common practice to utilize the design safety factor and to integrate it into the product development process (PDP).

---

**Key Words:** Product Development; Product Design; Design Situations; Generic Product Design & Validation Methodology.

## 1.Introduction:

The particular frameworks described in this article are elaborated because they have the potential to satisfy two objectives of engineering design: to ensure consideration of each of the elements necessary for a successful design and to ensure that all the consequences of the application of the designed device or process throughout its lifetime are examined [7]. For almost all products, it is no longer acceptable to develop major enhancements without first consulting customers to forecast the market acceptance of the improvements [7; 2]. The risk is just too high to accept one product manager's belief in their «feel» for the market. Rather, a team must apply statistically sound measurement methods of a product's intended customer population [2, 6, 11].

It is critically important to understand the competition and the trend of any new technology introduction into the market [6]. It is also important to design robust performance into a product, so that the product is as high quality as possible given its price. These goals and associated methods have become the competitive weapons that allow design teams to ensure that their company leads the market [2, 6, 7, 11]. The problems encountered in product design are amenable to many solutions. There will always be more than one way to proceed, and there will certainly never be just one «correct» solution or design. The designer also cannot assume that he has the best answer just because he has an answer that appears feasible [2].

Given the fact that in the existing literature few articles describe the iterative process by which a concept is developed into a product in accordance with the specification data and current tool support, the design and validation methodologies proposed will focus particularly on the detailed design phase. More specifically, considerations should be given to detailed design



methodologies that target multiple design criteria and adapt to various design situations. The detailed design phase in the product development process will also include both the product optimization and the product validation [79].

In the next sections (2 and 3) the product design process will be presented as part of the product development process and several design situations encountered in this process will be detailed.

## **2.Product Development Versus Product Design**

A product development process is the entire set of activities required to bring a new concept to a state of market readiness [2]. This set includes everything from the initial inspiring new product vision, to business case analysis activities, marketing efforts, technical engineering design activities and development of manufacturing plans [6]. Often it even includes the development of the distribution channels for strategically marketing and introducing the new product [6].

A design process is the set of technical activities within a product development process that work to meet the marketing and business case vision [2]. This set includes refinement of the product vision into technical specifications, new concept development, embodiment engineering of the new product and the validation of the product design at each stage-gate of the design process [2]. Neither the product development process nor the design process encompasses all the subsequent manufacturing processes when the products are physically made [2, 11].

However, the design of the manufacturing process is generally considered part of the product development process. Often the product design process and the design of its manufacturing system must be carried out simultaneously [11].

Similar to the manufacturing process that follows the product development process, there are also front-end activities that are required before product design and which, based on industry, may or may not be considered part of the product development process [6, 11]. For example, the Research & Development (R&D) phase of a new product development is when a new technology or a new methodology is developed for subsequent incorporation into products [2, 7, 11]. Today, large companies in many industries try to separate the R&D process from the product development process [2]. Thus, R&D efforts create new technologies and methodologies and develop them to the point where both technologies and methodologies are

encapsulated into a new system ready for immediate adoption by the product development teams.

A systematic effort and the contents of this paper are devoted to formalizing the activities of a design process at its detailed phase depending on the design situation by isolating each activity, understanding what is required as input, what is produced as output and then establishing optimization loops to repeatedly complete the activity [38, 79]. Product development then becomes a very rapid process of tailoring technologies into a new system that meets changing market needs without getting bogged down into researching how to obtain a new technology and/or methodology that does not really perform what is expected in the end [38, 79].

However, the product development process requires that engineers define the type of prototype or model, its use, and so forth. Often it is also important that the team decides how to implement a prototype or a model of the final product [2].

Generally speaking, a model is a representation that can be used to answer a question or set of questions [2]. This model may be anything from a no feasibility experiment to a fully developed performance expression over a feasible range of product design variables. The definitions of prototype and model sound enough alike that it prompts a question: Are prototypes and models the same thing? The answer is «not exactly» [2, 79]. The distinction between prototypes and models may have more to do with the intent behind their making and the environments in which they are tested than with any clear dictionary-type differences [2, 6, 11, 38, 79]. Prototypes are intended to demonstrate that a product will function as designed, so they are tested in their actual operating environments or in similar, uncontrolled environments that are as close to their relevant «real world» as possible [2, 6, 11, 38, 79]. Models are intentionally tested in controlled environments that allow the designer to understand the particular behavior or phenomenon that is being modeled.

For example, an all terrain vehicle (ATV) prototype is made of the same materials and has the same size, shape and configuration as those intended to run off road. An ATV model would likely be much smaller. It might be tested in laboratory, but it is not a prototype [79].

Moreover, prototypes and models have different roles in engineering design because of their intents and test environments [6, 11, 79]. The decision to build a prototype depends on a number of things, including: the size and type of the design space, the cost of building a prototype, the ease of building that prototype, the role that a full-size prototype might play in ensuring the widespread acceptance of a new design, and the number of copies of the final artifact that are

expected to be made or built [3, 37, 38, 80]. Little and Dym [3] provide an interesting approach that compares the design and testing of airplanes to that of buildings. This approach has to do with the number of copies being made [3, 37]. The design spaces of both aircraft and high-rises are large and complex. There are literally millions of parts in each, so many design choices are made along the way. In this case, the complexity and expense of building an aircraft prototype argue directly against the idea of building such prototypes. Also, we build prototypes of airplanes because those particular planes are not simply thrown away as «losses» after testing; they are retained and used as the first in the series of the many full-size designs that are the rest of the fleet of that kind of airplane [3, 37, 80].

Buildings failures are rare in part because high-rises can be tested, inspected, and experienced gradually, as they are being built, floor by floor [3, 37, 80]. So, the answer to the question «When do we build a prototype?» is «It depends on the design field on the type of product and on the design situation ».

### 3.Types of Design Situations

In this section, a classification of four design situations is proposed with the aim of providing to students and to designers a good understanding of the main design situations that they could meet throughout their careers.

Otto and Wood [2], present in their book the design situations as original, adaptive and variant designs. The authors [2] provide a generic approach regarding the design situations and they just say that an original or new design is equivalent to an invention [2, 6]. In fact, *an innovation* corresponds to the introduction of a new or significantly improved item in terms of its characteristics or intended use [2, 3, 6, 11]. *Adaptive design* involves adapting a known system to a changed task or modifying a significant subsystem of a current product [2]. This type of design does not require a massive restructuring of the system within which the product operates and which is the reflection of the demands of the marketplace [2, 6, 11]. Another approach founded on existing references is *the redesign*. Redesign does not mean adapting design. Rather, redesign only implies that a product already exists that is perceived to fall short in some criteria and for which a new solution is needed [2].

In the context of this paper, *new design* involves elaborating new solutions for a given task. The result of a new design could not necessarily be an invention but it has to be original. For example, a new ATV light fixture can be a new design but it will not be an invention. The

designers will generate a totally new geometry of the product (so it is original), but we cannot say that it is an invention [79].

Contrary to new products, *an evolution from an existing product* is when a product is modified or improved by adding new functions or simply a new geometry starting from a reference product that already exists [79]. This type of design dominates the vast majority of design activities [79]. Customers generally want new products that fit in their current life-style. Within the boundaries of this life-style, their ways of using the product evolves along with the technology [2, 6, 11, 37, 79]. Meeting these evolving needs and boundaries can be very profitable with minimal risk. An example of this approach would be the face-lift of an ATV.

*Variant design* involves varying the parameters of certain aspects of a product to develop a new and more robust design. Thus, several parameters could be changed in this case: size, geometry, material properties, etc.). This type of design usually focuses on modifying the performance of a subsystem without changing its configuration. It is also implemented when creating scaled product variants for a product line. For example, a bicycle resized to a larger load rating will require greater critical sections on the fork and on the frame. This approach (variant design) regarding the design process was identified during our research and a specific methodology has been developed (see section 5) with the aim of providing technical and logistical information as well as for the first two approaches presented above [79].

## **4.Selection of the Design and Validation Methodologies in the Product Development Process**

The need to formalize the design and validation process at its detailed phase has been identified both in the industrial and academic fields. Thus, to improve the communication and the transfer of information between all actors involved in the product development process, a common vulgarization describing the activities of design and product validation has to be established [23].

### **4.1.Types of Product Criteria**

The selection table shown in Figure 102 was built to meet the needs described above and it synthesizes several types of activities at the detailed design phase of the product development process. These activities are based on design criteria established at the preliminary design phase and on product types. Thus, three blocks in close interaction are identifiable in the selection table: (1) Design Criteria, (2) Product Types and (3) Design and Validation Methodologies [21, 42].

| Design criteria   |  | Design and validation methods                                  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|
|   |  | Quantitative criteria of 1st. rank                             |   | Quantitative criteria of 2nd. rank                                 |  | Qualitative criteria  |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
| Endurance limit   | Stiffness  | Ultimate strength  | Deflection  | N1a or N2a; E1(x); P1(x) or P2(x)                                  | N1a or N2a; E1a or c; P1a or c; VE1                            | N1a or N2a; E1b or d; P1b or d  | N1b or N2b; E2(x); P2(x)   | N1b or N2b; E2a or c; P1a or c; VE2                            | N1b or N2b; E2b or d; P2b or d  | N1b or N2b; E2b or d   | N1b or N2b; E2b or d   |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Price/weight ratio  | Price/perform. ratio   | Aesthetic  | Assembly  | Manufacture  | Environment  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | VE(x); VC1 or 2; VD; VO   | VE1; VC1; VD; VO   | VE2; VC2; VD; VO   | VE2; VC2; VD; VO  | VE2; VC1 or 2; VD; VO  | VE2; VC2; VD; VO   |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | VC1; VO   | VC2; VO  | VC2; VO  | VC2; VO   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex                |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive |
| Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |
|   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |  |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  | Structural AND Aesthetic, Fixe OR Mobile, Mass production, Complex, Expensive | Structural, Fixe OR Mobile, Non-expensive, Mass production, Simple            | Aesthetic, Fixe OR Mobile, Expensive, Mass production, Complex     | Structural AND Aesthetic  |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |   |  |   |

Figure 102: Selection table of product design and validation methodologies

On the left of the table, several design criteria have been chosen. To better organize the stages of criteria analysis, a classification into three categories of these design and validation criteria is provided: (1) Quantitative criteria of 1<sup>st</sup>. rank, (2) Quantitative criteria of 2<sup>nd</sup>. rank and (3) Qualitative criteria.

The quantitative criteria of 1<sup>st</sup>. rank have been defined as the mechanical, quantifiable criteria with a direct impact on client safety or product integrity throughout its life. The analysis of such criteria will always require a safety factor to ensure that the use of the product will be done while safeguarding the user and in compliance with any applicable safety standards.

The quantitative criteria of 2<sup>nd</sup>. rank are the design criteria related to the economic dimensions of the product. They are very important for the commercial success of the product on the market. The analysis of this type of criteria is required to determine whether the functional solutions found are economically viable, while still meeting the quantitative criteria of 1<sup>st</sup>. rank. In order to avoid the circumvention of certain quantitative criteria of 1<sup>st</sup> rank, it is very important not to make the analysis of the quantitative criteria of 2<sup>nd</sup>. rank before the analysis of those of 1<sup>st</sup>.rank.

*The qualitative criteria* are defined as any non-quantifiable design criteria of a product. As Figure 102 shows, this category of criteria encompasses the paradigm «Design for X». By integrating the analysis of quantitative criteria in the activity flow of the design process, multidisciplinary teams will become familiar with the paradigm of «Design for X». Thus, the number of errors detected at the prototyping phase, or even on production or assembly lines will be significantly reduced.

## **4.2. Product Types**

In the selection table shown in Figure 102, the most common combinations (non-exhaustive) of product characteristics have been identified. Based on these characteristics, designers will know which design and validation methodology is most appropriate for their designs. First of all, three main categories are identified and they are detailed in the third section of this paper: (1) New product, (2) Evolution from an existing product and (3) Variant design. Then, for each category mentioned above, several additional features were added in order to properly determine the profile of the product.

In the first stages of the design process, engineers should determine whether the product developed is a structural part or an aesthetical part of a system. Moreover, a designed product may be both structural and aesthetic at the same time (ex.: a vehicle body), it could also be only structural (ex.: a vehicle frame) and yet it could just be aesthetic (ex.: a projector glass). A structural product requires an analysis of loads and the calculation of a safety factor, while an aesthetical product will not undergo mechanical loads if only the environmental impact act on it, such as sun, rain, freeze and thaw, etc.

But if only the characteristics presented above are to be considered, the range of products will be too large and it will be impossible to envisage a tailored design methodology for each product. To exemplify the idea, we consider two different products: a frame and a steering arm. Both are structural products, but the complexity of a frame could broadly exceed the complexity of a steering arm. Thus, for a complex product, analysis criteria will be sought and numerical simulations will be made, while for a simple product, analytical calculations will be sufficient to reach a suitable solution. Therefore, to choose the best design and validation methodology, the profile of the products has to be further developed and the level of product complexity has to be well established.



The economics also plays a very important role in the product development process and engineers must keep track of the expenditures incurred by the product at all stages of its development process [49]. Product complexity can affect costs, but it is not necessary or possible to assess a product cost simply based on its complexity. For example, there may be a simple product with a design variable, such as the choice of material, which can make the product become much more expensive. In this case, a deeper economic analysis will be required. However, if the costs of material, equipment or manufacturing process are not high, the product will be identified as a cheap product even if its geometry is complex.

Finally, the last features to be used for «shaping» the profile of a product are based on the number of items produced after launching the product on the market. Here we identify five cases: (1) reduced series, (2) mass production, (3) prototype and reduced series, (4) prototype and mass production and (5) prototypes. By knowing these possible characteristics of the product, the engineers will be able to better anticipate the costs and delays in the product development process. For example, for a mass product (more than 100,000 items) engineers should provide an appropriate lifetime for the tools (injection molds, cutting and bending tools, etc.) and plan for the cost of their replacement. Moreover, if a prototype is required during the design process, the expenses and delays incurred in the development process could increase depending on the complexity of the tasks required at each phase of the product prototyping [59].

### 4.3. Design and Validation Activities

The third block of the selection table provides information regarding the appropriate design and validation methodology corresponding to the product type selected and to the chosen design criteria. All eligible methods have been symbolized and framed in the middle of the table and a legend was created to provide the information concerning the symbols used in the table. The selection table presents seven main categories of design and validation methods which are: (1) *numerical design and validation*, (2) *experimental design and validation*, (3) *physical design and validation*, (4) *economic validation*, (5) *client validation*, (6) *dimensional validation and* (7) *tooling validation*. These approaches will be detailed in the next section.

The terms «static» and «dynamic» are used in this paper to provide general information regarding the types of the activities performed inside a design and validation step with their own complexity and deadlines. In the context of our research, design and validation

methodologies for static loads are related to the calculations, analysis and testing of a numerical or physical model or product for which the amount of external forces and moments is considered zero. In the same context, the design and validation methodology for dynamic loads are used in calculations, analysis, simulations, experimental setups and under real life condition testing, where cyclic or combined loads are considered. Generally, in the case of a structural product, the static analyses are performed at the detailed design stage to identify the critical sections of a structure (product). Then, a dynamic analysis (fatigue) is needed to determine the corresponding lifetime of the product under development [62].

Finally, the terms «*destructive*» and «*non-destructive*» added in the legend for experimental and physical design and validation methodologies, provide, to those involved in the product development process, the information regarding the nature of the tests to which the product will be submitted. If the test is destructive, the product will be tested until it fails in severe conditions and the results will be analyzed according to the shape of the fracture, whereas in the case of a non-destructive test, the product performance will be analyzed under normal conditions of use, which should not cause its failure. The tests Euro-NCAP represent a good example of *destructive* tests that aim to analyze the behavior of several structural parts of a vehicle after various impacts which could occur during its functional life. On the other hand, the experimental tests used to verify the behavior of a headlamp in a vibration environment are considered as being a *non-destructive* validation methodology.

Each design or validation activity is very important to assess the client needs and they can also be expressed along two dimensions, depending on clients needs and on design situation: *absolute* and *relative* design approaches. For example a client can express a desire concerning the weight of a product component. This requirement can be *absolute*, when the design criterion is a value that must be respected (ex.: max. 50 kg.) or *relative*, when the design criterion is expressed as a wish of the client (ex.: the lightest in the market). Moreover, when the engineers analyze the loads applied to a new product, they have to establish a new service load cycle. In this case, they are dealing with an *absolute design* approach. On the other hand, when an existing product represents a design starting point for an improved product, the engineers will take in consideration the initial service load cycle of the existing product to establish the new loads applied to the product. This would be a *relative* design approach.

The next section of this paper will propose three workflow diagrams which integrate the most relevant combinations of design criteria and product types identified in the recreational product



industry. These workflows were developed in the scope of the main design situations identified in this industry: (1) new design, (2) evolution from an existing product and (3) variant design.

### **5.Generic Design and Validation Methodologies based on different design situations:**

Based on the approaches presented in the 3<sup>rd</sup> section and those developed in the 4<sup>th</sup> section of this paper, three generic design frameworks (methodologies) are proposed. They represent an improved synthesis of all stages of the design process at the detailed design phase, including the product validation stage. Depending on the design situation (see the 3<sup>rd</sup> section), each of the proposed methodology should act as a roadmap for designers as it specifies the activities to be made at each phase of the product design process.

Design and validation methods include discipline-specific CAD (computer aided design) and means including formal design reviews, public hearings (if applicable) and testing.

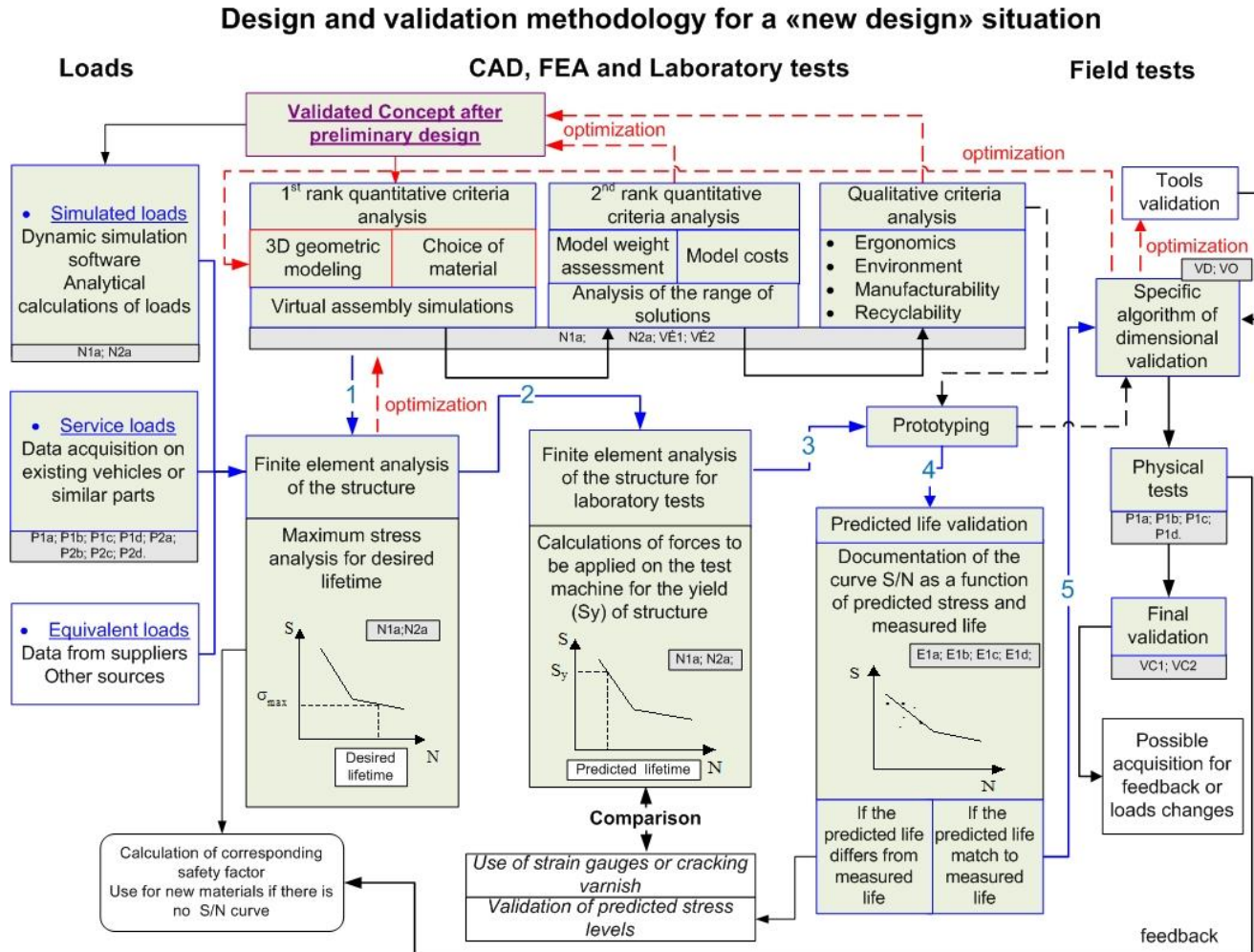
Thus, during the design communication (usually performed at the end of the design process) the multidisciplinary teams will document the manufacturing specifications and their justifications. Proposed design and detailed specifications represent the inputs for this step. The main task is the documentation of the final design and the outputs at this level of the design process are the final written and oral reports to the client containing: (1) the drawings and design details and (2) the fabrication specifications.

The feedbacks from clients and users, and itemized lists of required deliverables represent the source of information for the design communication.

The design and validation methodologies proposed in sections 5 could be considered as a checklist which can be used to ensure that all the required steps have been dealt with. Checklist like this can be used by design organizations to specify and propagate approaches to design within their firms.

#### **5.1. Design and Validation Methodology for a New Product:**

Figure 103 shows the steps to follow by the design team from the modeling stage of the product until its final validation phase. The methodology is generally applicable to structural products from the recreational products industry (frames, handlebars, forks, bumpers, etc.) for which a detailed study of their service life is required.



**Figure 103: Design and Validation Methodology for a New Product**

As the methodology shows, there are activities related to the validation process that can be made at the detailed design stage or earlier. For example, several tools for gathering data loads can be used before the steps of criteria analysis. For this design situation, three types of data acquisition methods have been identified: (1) virtual method (*simulated loads*), (2) experimental method (*service loads*) and (3) benchmarking methods (*equivalent loads*). The virtual method uses simulation software to determine the dynamic loads on a product under certain conditions (speed, weight of the product, etc.). Using the experimental method, data acquisition is made with strain gauges, applied to existing vehicles that have been developed either within the organization or among competitors. The benchmarking method uses data available from components suppliers or other sources, such as feedback provided by the dealers following the

repairs during the warranty period, etc. These data could also have been obtained using one of the two previous methods outlined above (virtual and experimental methods) or following the analysis of a failure that occurred during the use of the product.

As illustrated in figure 103, the analysis of the quantitative criteria of 1<sup>st</sup> rank represents the early stage of the detailed design and its result will be a virtual prototype (DMU). The main activities carried out at this stage are the numerical modeling of the geometry and the analysis of several candidate materials. These activities can be carried out simultaneously and they aim to analyze the product's ability to withstand the loads identified in the upstream steps. Several iterations are possible at this stage by using finite element analysis software to model the shape of the product in accordance with the design criteria of 1<sup>st</sup> rank (stiffness, fatigue limit, deflection limit, etc.).

In the second step of the criteria analysis stage, designers are interested in the product's ability to respect other quantitative criteria related to the competitiveness of the product on the market such as its cost, weight or volume. These criteria are closely linked and depend on the product geometry and material choice. Backward iterations to the previous steps are also possible and even desirable in some cases to identify more relevant combinations (geometry/material) that meet all quantitative criteria (1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> rank).

To determine the profitability of the product the cost analysis should cover all those activities of the PDP that involve spending (design/validation, manufacturing, maintenance, recycling, transportation, storage, etc.). Thus, an inconclusive result for such an analysis could lead to stopping the project or to search for alternatives (removal of a production chain, outsourcing tasks to suppliers, etc.).

Moreover, qualitative criteria analysis is imposed at the detailed design phase to verify whether a product meets the non-quantifiable requirements established at the preliminary design phase. Ergonomics, aesthetic and manufacturing are part of this category of design criteria and their analysis will provide to designers a return on customer needs and on the conceptual choices. Thus, depending on the customer needs, several iterations may be initiated on the geometry or material of the product, always in line with the quantitative criteria analyzed in the previous steps.

As a first step of the structural validation of the product, a finite element analysis is conducted using the values identified at the loads calculation step and the data regarding the characteristics of the chosen material to determine the maximum allowable stress in the critical sections of the product for a desired service life (*see the box «finite element model of the structure»*). A safety

factor will be required in the case of materials for which no S/N curve is available to determine the life expectation of the product.

After determining the maximum stress that ensures the desired service life of the product, a second finite element analysis is necessary to simulate the product on a testing machine and the forces to be applied by the machine. Following the finite element simulation of the product under laboratory tests conditions, the loads applied by the test machine should produce the same stresses in the critical sections of the product when using the service loads that were simulated in the previous step). By calculating the loads to be applied on the test machine, the engineers will also be able to identify the corresponding loads for a predicted service life in an accelerated test (*see the box «finite element model of the structure for laboratory tests»*).

Hence, these steps of finite element simulation represent the preliminary validation of the product (virtual dimension) and they will be followed by experimental and field tests on a prototype (3)(physical dimension), to verify the correspondence between the theoretical calculation of the product life and the results of the physical tests. The laboratory tests (4) involve the application of cyclic loads calculated in step 2 on the test machine and they are used to validate the predicted life of the product and the S/N curve of the chosen material.

Finally, the last validation of the product will be performed with the client (client validation) to ensure that its needs are fully satisfied. In this context, the client could give his opinion of the product relating to the design criteria of the manufacturer or designer, without being able to directly compare the new product with some competitor's products (in this case we are talking about an *absolute validation approach*). On the other hand, the client could also express his opinion related to competing products which are available on the market (in this case we are talking about a *relative validation approach*).

In the next section, the second design methodology based on a different design situation will be presented.

## **5.2. Design and Validation Methodology based on an Evolution from an Existing Product**

The detailed design phase of the PDP for a new design (see the 3<sup>rd</sup> section) was just formalized in the above section and several design and validation tasks were prescribed.

Many design processes are **descriptive**: they describe the elements of the design process. Our models are **prescriptive**: they prescribe what must be done during the design process. Hence,

Figure 104 introduces a new prescriptive model for the design process of an evolution from an existing design (see the 3<sup>rd</sup> section).

It shows the new functions of the product (sometimes identified as the requirement for a design), as the starting point. The final validation is the end point of the product design process.

When a new design is created from an existing product, it can be possible to gather and assess data about a potential design solution by undertaking experiments in the field or in a laboratory. For example, if the solution involves a structure, it may be possible to measure the stress or strength of critical parts of the design in a laboratory test (E2x or P2x).

Enough technical details have been worked out since the beginning of this stage so that it becomes possible to estimate costs, weights and overall volumes. For a new vehicle frame project, for example, the new functions to address might include the extension of a rack or a convertible top. The final evaluation of these functions will depend on the client's needs, such as the product intended use, its allowable cost, and even the client's aesthetic values.

The load cases are obtained in this instance by applying the relative approach of laboratory tests (1) in which similar products on the market are tested. The results of these tests are used to verify or to establish a new safety factor for the improved product.

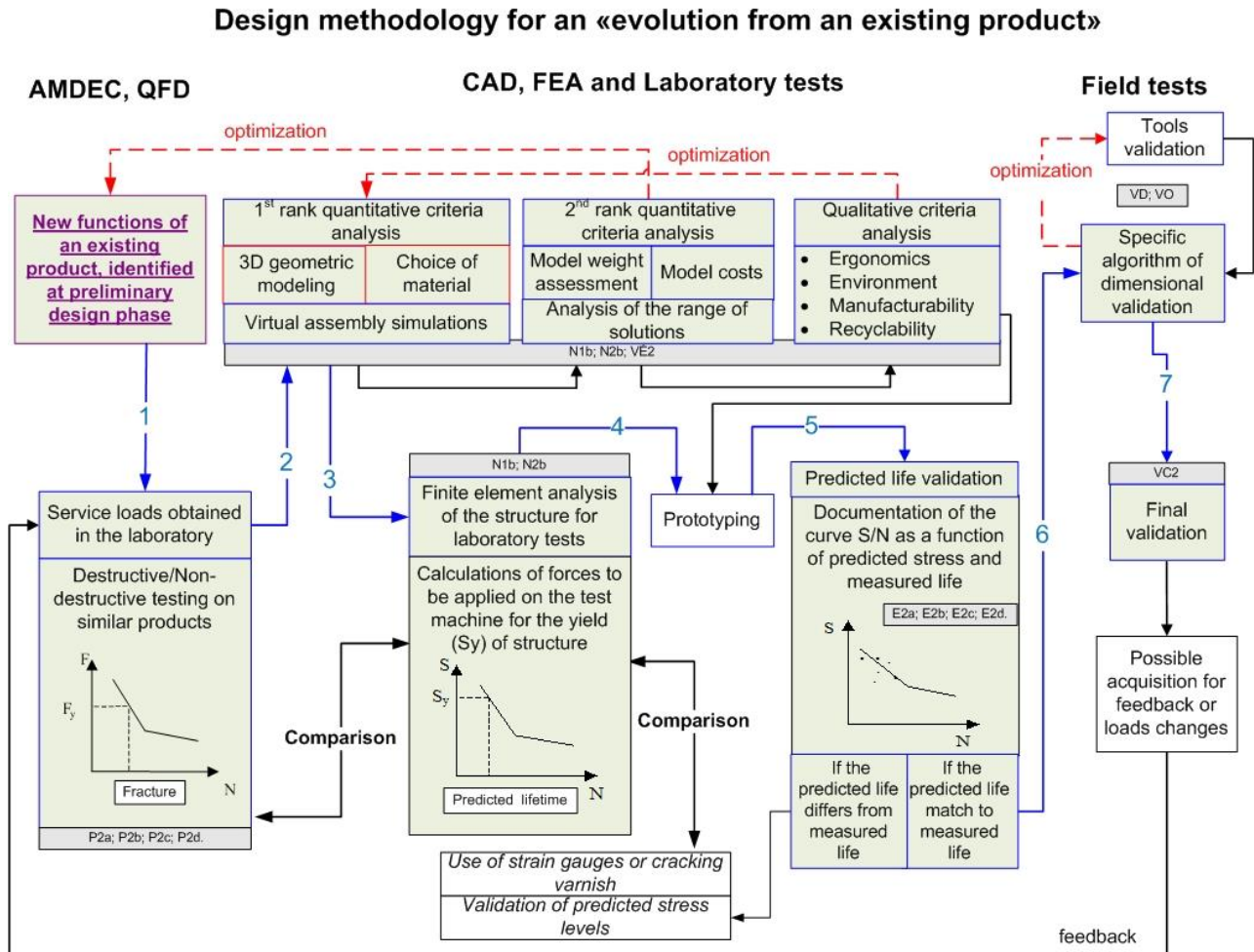
For this design situation where an existing product represents the main reference for the improved product, the design criteria analysis step (2) will be performed following the relative design approach detailed in section 4.3 of the paper.

Unlike the first design and validation methodology presented in Figure 103, the methodology used for an evolution from an existing product (Figure 104) does not require two finite element simulations because the laboratory tests performed to establish the service loads will provide enough information on critical areas of the structure. In this case, the laboratory test results combined with the product geometry and the characteristics of its material will be the input data for the *«finite element model of the structure for laboratory tests»* (3) which was detailed in section 5.1. Thus, the identification of the service loads will be performed using an experimental method based upon the relative design approach.

The design and validation methodology illustrated in Figure 104 includes appropriate physical modeling and verifications (P1x in the selection table in Figure 102) that the design requirements are met. It also includes computer modeling and simulations (N1b and N2b), prototype development if necessary (4), laboratory (5) and field tests or proof-of-concept testing (E2x).



During the detailed design phase, the engineers refine and optimize the final design, assign values to variables and fix the last design details. Thus, the design process outlined in Figure 104 is not linear because two very important elements were added: feedback and iteration.



**Figure 104: Generic Design and Validation Methodology based on an Evolution from an Existing Product**

Feedback occurs in two notable ways in the design process: First, there are *internal feedback loops* (red dot lines) that come during the design process and in which the results of the performance test and evaluation task are fed back from the preliminary design phase to verify that the design performs as intended; Second, there is an *external feedback loop* (black lines) (Figure 103 and Figure 104) that comes after the design reaches its intended market and where user feedback is then exploited to validate the successful design.

The second element that was added in the proposed design methodology is *iteration*. We iterate when we repeatedly apply a common method or technique at different points of the design process. Sometimes the repeated applications occur at different levels of abstraction wherein the engineers know different degrees of detail, so they might use different scales.

### 5.3. Generic Design and Validation Methodology for a Variant Design Situation

The methodology shown in Figure 105 presents the flow of all the activities linked to the detailed design and validation for a variant design situation.

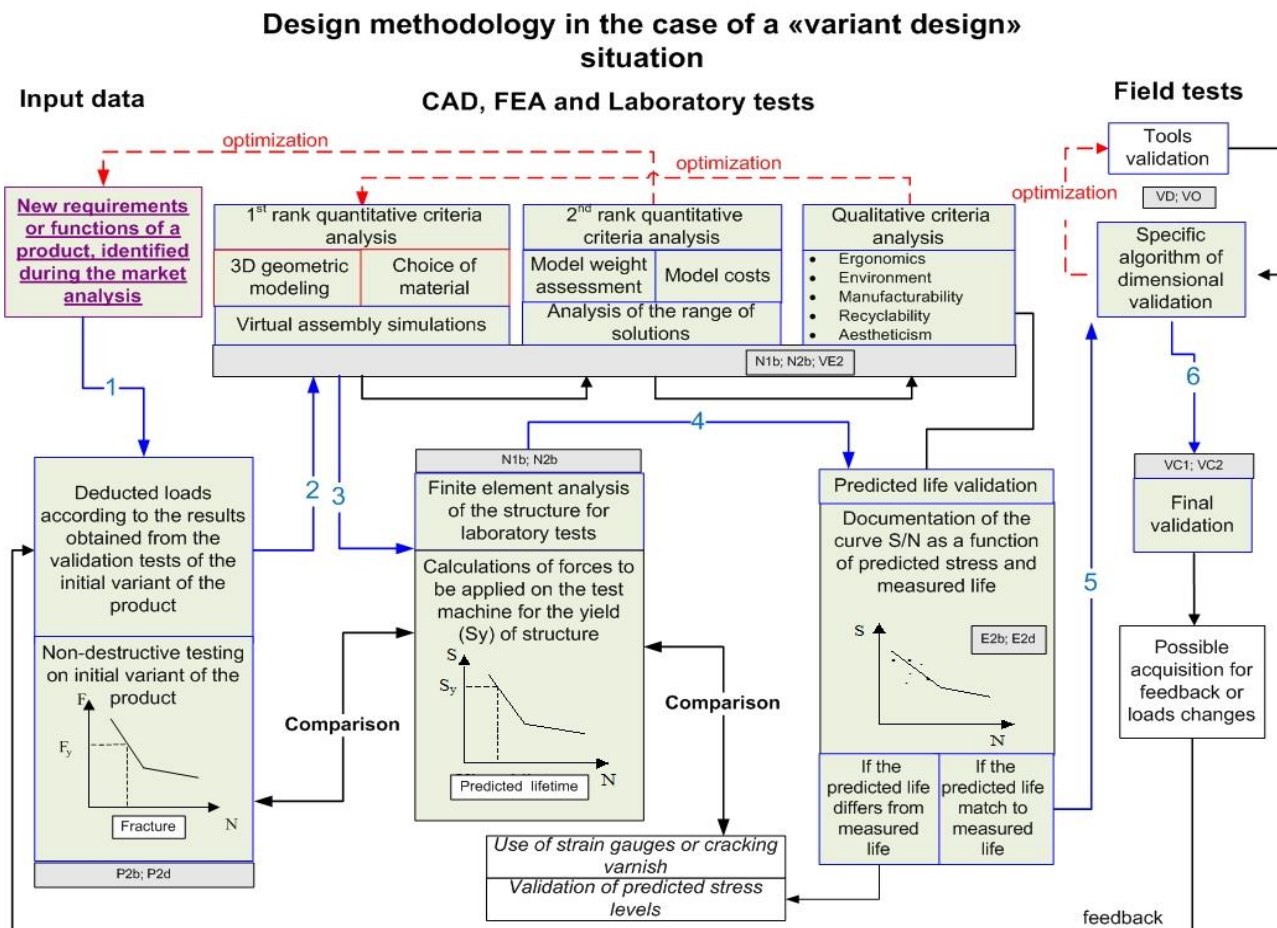


Figure 105: Generic Design and Validation Methodology based on a Variant Design

As was mentioned in the third section of this paper, the variant design usually focuses on modifying the performance of a subsystem without changing its configuration. It is implemented when scaled product variants have to be created for a product line.

For the variant design situations, the activities performed at the design criteria analysis step should not be as long as they were in the design situations presented in sections 5.1 and 5.2 because of the availability of information at this stage of the design process. In fact the concept with its embodiment already exists. The only task of the engineers at this level is to adapt the initial concept to some new characteristics and/or needs of the client.

The data obtained at the service loads identification step (1) and those obtained at the design criteria analysis step (2) will be used to identify the loads to be applied on the test machine (3). These data have to include the three main elements mandatory in the product life analysis: loads, geometry and material. At this step, a finite element simulation will be performed with the scope of finding the loads to be applied on the test machine for an accelerated laboratory test on a prototype (4). A comparison has to be made between the results of the simulation and those of the laboratory tests (5) carried out to establish and validate some accelerated service load cycles applicable to the initial product. Hence, several iterations loops will be performed until the stresses obtained following both methods are similar.

The aim of the experimental validation made on the fatigue test machine is to provide the certainty that the product fulfills the quantitative criteria of 1<sup>st</sup> rank. This step of the PDP is also meant to be a very useful tool to improve or customize the existing S/N curves of the materials. The results of the experimental tests are processed and a new comparison has to be made to check the accuracy of the theoretical life prediction. At the end of the experimental validation step, the engineers may face two different situations:

1) If the product life prediction doesn't match to the measured product life, a detailed analysis of the fracture zone will be carried out by the engineers to establish whether the material properties does not correspond to its specifications or the loads applied by the test machine were not calculated properly.

2) The second situation, and the most desired, is when the measured product life is the same or almost the same as the predicted life for the product. In this situation, the next activity of the PDP will be triggered by the engineers.

Depending on the product type (*structural or aesthetic*), the first model could be built either after the criteria analysis stage or after the finite element analyses. For example, if the engineers design an ATV headlight which is an aesthetical product, they won't need to calculate and simulate the fatigue life of the product. They will be able to build the first models of the series using just the results of the criteria analysis stage of the PDP. As it can be seen in Figures 103, 104 and 105, if the engineers deal with a structural product such as a frame or a steering arm, they will have to reserve supplementary resources (time, money, people, equipment, processes, etc.) to ensure that the initial objective of the project will be reached successfully.

The tooling validation is another very important step in the PDP. Tooling validation represent the step in which the engineers have to verify the robustness of the manufacturing process and the



parameter variabilities during the manufacturing process. Without tooling validation, the product is not ready for mass fabrication. The risk for a company for not carrying out this step of the PDP would bear significant consequences from an economic view point not to mention its reputation. Depending on the notoriety and the resources of a company, the manufacturing process variations or in the worst scenario, its failure, could lead the company either to lose future contracts or projects or even to file for bankruptcy if the financial loss is catastrophic.

The dimensional validation step is performed with the aim to verify and validate the dimensional variations during the manufacturing process. For aesthetical products such as an ATV headlight or stoplight, this step of the PDP is critical because the gap between the product (headlight) and its vicinity (body) represent for both, the client (recreational product company) and the user (recreational product owner) two very important requirements. For the client, this requirement is a very important specification from a product assembly point of view. For example, if the variability of the fixation points exceeds the maximal level established at the criteria analysis stage of the PDP, the fixation of the headlight on the ATV frame becomes erratic. On the other hand, the user perception of this requirement is based in particular on the aesthetic design criteria. The user will never accept a vehicle with light fixtures that are not well framed into the body. Generally, the nominal values of these gaps and their tolerances are established by both, the designer and the client.

As well as for the first two design situations (new product and evolution from an existing product), the final validation with the client is also required for the variant design situations. At this stage of the PDP, the product is tested in the field under real service loads. Hence another data acquisition is possible either for the product feedback or for the loads validation. The final validation of the product represents the point where a design project ends and the first production series are initiated.

## **6. Conclusion:**

Given the fact that this paper is dedicated to the formalization and integration of design and validation activities at the detailed design phase of the design process the proposed methodologies focus on optimizing the service loads, the material and the geometry of the parts designed to be used on recreational products. Thus, in what follows, there are some elements that outline the contributions of the proposed methodologies in both academic and industrial fields of design method formalization:

FOR THE ACADEMIC FIELD:

A. The iterative fashion of the methodologies and the integration of both design and validation activities allow the design teams to reduce the time allocated to detailed design processes and to increase the accuracy of the product validation;

B. The proposed methodologies represent a very useful tool for training undergraduate students in engineering;

C. The communication in the academic field will be improved by formalizing the design and validation methodologies.

From another perspective, regarding the recreational industry domain, three functions of the proposed methodologies described above have been identified:

A. They provide a graphical planning tool (Workflow) for the various steps of the PDP, from the detailed design activities to the product's final validation;

B. They allow the combination of human, material and financial resources at different stages of the detailed design phase of the PDP;

C. They make it easier to communicate design and validation methods among various members of the organization (managers, new engineers, technicians, etc.)

In the prescriptive design and validation methodologies presented in this paper, iteration plays a very important role in determining the material, shape and size of the developed product. This imply the initial selection of a material, shape and size for a model, with the hope that the design criteria can be met and that strength, life and safety goals will all be achieved after successive controlled improvement to the initial proposition.

Another important aspect to be taken into account by the designers is that of «design for X» where X is an attribute such as manufacturing, reliability, recycling, environment, etc. Since most products are designed to be built, sold, used and then disposed of, these attributes were collectively integrated in the proposed methodologies as qualitative design criteria.

Thus, the proposed methodologies are very helpful for the good communication among all three parties in the **designer-manager-user** triangle in which tasks such as analyzing, modeling, testing, evaluating, and optimizing are performed.

## ANNEXE F: Article 5

### Avant-propos

#### **Auteurs et affiliation :**

C. Iorga : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique;

A. Desrochers : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date de soumission :** 10 avril 2013

**Revue :** A.S.M.E. «Mechanical Engineering Design»

#### **Références :**

7) [Jones C. and Ertas A. (1993)]; 2) [Otto K. and Wood K. (2001)]; 14) [Boothroyd G. (2002)]; 6) [Cooper G. Robert (1993)]; 79) [Iorga C. and Desrochers A., (2011)]; 38) [Maropoulos P.G., Ceglarek D. (2010)]; 3) [Dym C. and Little P. (2009)]; 37) [East W., Kirby J., Liu L., (2008)]; 80) [Ertas A. and al. (1989)]; 61) [Tacher M. (2012)]; 81) [Conle F., Chu C. (1997)]; 82) [Stauber R. and Baur M., (2000)]; 83) [Fricke W., (2003)]; 84) [Kadhim N. A., Abdullah S., and Ariffin A. K., (2011)]; 85) [El-Ratal W., Bennebach M., Lin X., and Plaskit R., (2002)]; 86) [Lee Y., Hathaway R., and Barkey M., (2005)]; 87) [Choi Y., Yeo H. T., Park J. H., Oh G. H., and Park S. W., (2007)]; 88) [Lee D. C., and Han C. S., (2009)]; 89) [Lee D. C., Jang J. H., and Han C. S., (2006)]; 90) [Joo S. G., You S. S., Joseph A. F., and Leser, (2003)].

**Titre français :** Méthodologie de conception et validation dans une perspective de prévision de la durée de vie pour les composantes structurales d'un véhicule récréatif

#### **Contributions au document :**

Cet article contribue à la thèse en présentant d'une manière prescriptive l'application de la méthodologie développée dans un contexte industriel, en prouvant donc sa pertinence et son applicabilité. En raison des aspects liés à la nature confidentielle du projet, l'article présente

d'une manière plutôt générale la méthodologie sans fournir des données et des résultats quantitatifs. En effet, le chapitre 4 du présent document présente plus en détail et donc, d'une manière descriptive, l'application de la démarche développée.

### **Résumé français:**

*L'intégration de l'optimisation et de la validation à la phase de conception détaillée du PDP, devient essentielle à la réalisation d'un produit qui répond aux besoins des clients de point de vue qualité/prix et/ou prix/performance. Une telle intégration implique des exigences concernant le comportement des composantes structurelles, notamment dans le cas des véhicules. Conséquemment, pour atteindre l'objectif de réduction de poids pour le sous-système structurel d'un véhicule récréatif, une méthodologie qui permet d'optimiser les paramètres de conception selon plusieurs types de critères, a été développée.*

*L'objectifs de ce document est de présenter une méthodologie qui met en lumière les défis passionnants de la conception du produit et permettent le développement des solutions créatives, efficaces et rentables.*

*Les activités d'optimisation intégrées aux étapes de conception détaillée, permettent de trouver une ou plusieurs combinaisons de paramètres qui rencontrent les critères désirés, tandis que les activités de validation permettent la rétroaction sur les besoins du client et sur les spécifications du produit.*

## **Design & Validation Methodology from a Life Prediction Perspective for the Structural Components of a Recreational Product**

***Iorga Cristian*** (P.eng., M.Sc.) ; ***Desrochers Alain*** (P.eng., Ph.D.)

Université de Sherbrooke (QC), Canada

### ***Abstract:***

*Integration of both **optimization** and **validation** at the detailed design phase into the product development process becomes key to achieving a product that meets the client needs from a price/performance/reliability perspective. Such integration entails more accurate*

*requirements regarding the behavior of the structural components, especially in the case of vehicles. Therefore, to reach the objective of weight reduction for the structural subsystem in a hybrid roadster project, a methodology that optimizes these elements according to the following types of design criteria has been developed:*

- *Structural criteria in order to support the specified loads;*
- *Weight and cost criteria to assess some market targets;*
- *Qualitative criteria such as aesthetic, assembly or manufacturing.*

*One of the objectives of this paper is to outline a methodology that highlights the exciting challenges of product design and allow both engineers and students to focus on the development of a creative, effective and profitable solution. Another challenging goal of this paper is to integrate **design optimization** and **design validation** at the detailed design phase in the product development process. The optimization process allows finding one or more combinations of parameters maximizing or minimizing a given design criterion, while the validation activities provide feedback to the designers in order to verify the calculation accuracy and the fulfillment of all design criteria. Depending on the nature of the load cases identified, a specific methodology has been developed to design and validate the frame of a recreational product.*

## **1) Introduction**

The particular framework described in this paper is developed because it bears the potential to satisfy two objectives of engineering design: to ensure consideration of each element necessary for a successful design and to ensure that all the consequences of the application of the designed device or process throughout its lifetime are anticipated and examined [7]. For almost all products, it is no longer acceptable to develop major enhancements without first consulting customers to forecast the market acceptance of the proposed improvements [2, 7]. The risk is just too high to accept one product manager's belief in their «feel» for the market. Rather, a team must develop and apply new design and validation methodologies intended to satisfy both the customer needs and the design criteria [2, 6, 14].

Incidentally, it is critically important to understand the competition and the trends before any new technology is introduced into the market [6]. It is also important to integrate robustness into a product, so that the product has as high a quality as possible given its price. These goals and associated methods have become the competitive weapons that allow design teams to ensure that their company leads the market [2, 6, 7, 14].

Given the fact that, in the existing literature, few articles describe the iterative process by which a concept is developed into a product in accordance with the specification data and using current tools, the design and validation methodology proposed will focus particularly on the detailed design phase [38 and 79]. More specifically, considerations will be given to detailed design methodologies that target multiple design criteria and adapt to various design situations [3]. The detailed design phase in the product development process will also include both the product optimization and the product validation [37 and 80]. The lack of connexions between several stages of the product development process (PDP) leads us to search for new approaches in terms of design and validation methodologies, to fill that gap [61, 81-85].

## 2) New design and validation methodology

The need to formalize the design and validation process at its detailed phase has been identified in both, the industrial and academic fields [79]. Figure 106 shows the steps to follow by the design team from the initial modeling stage of the product up to its final validation phase.

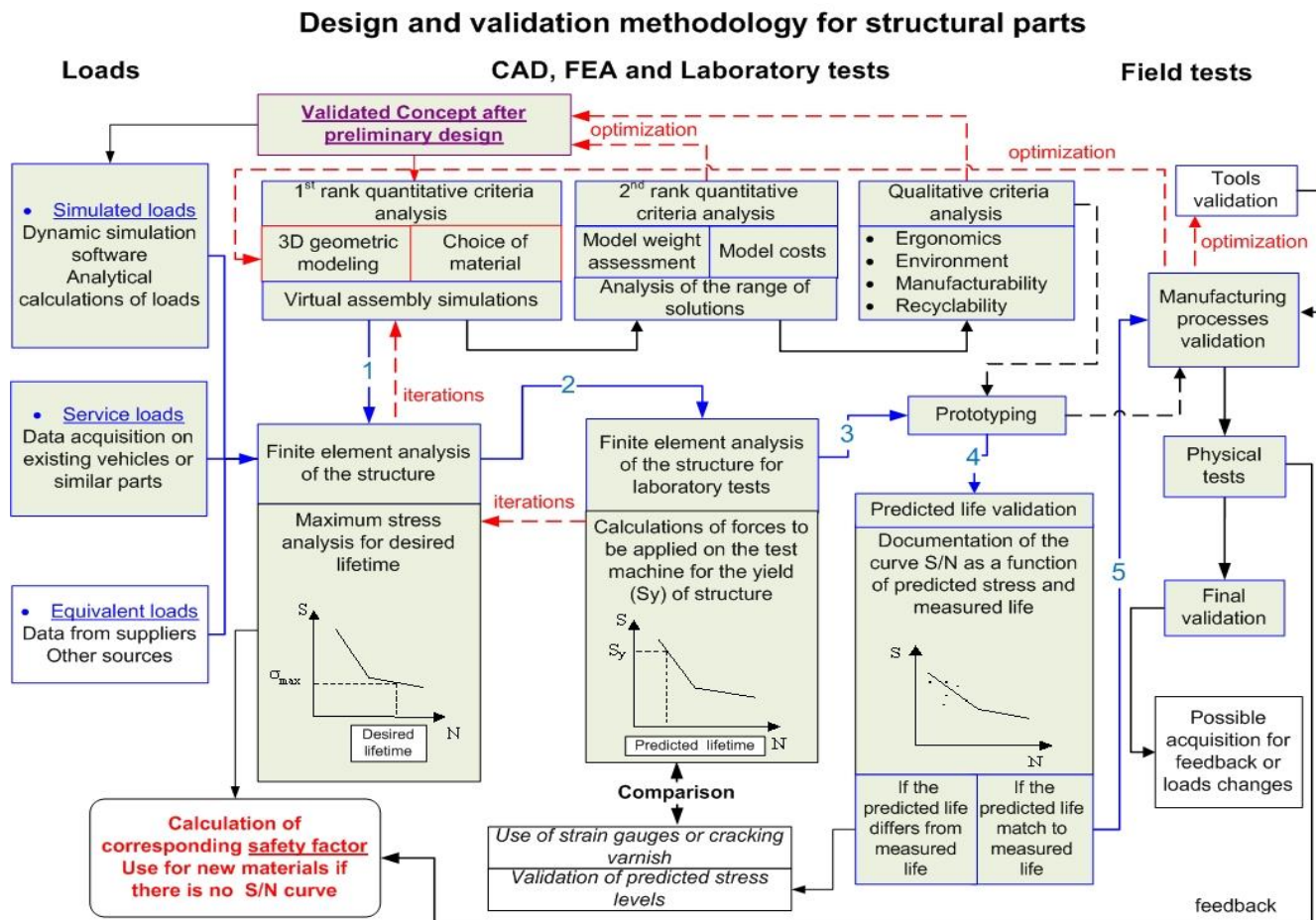


Figure 106: Design and validation methodology for the structural parts of a recreational vehicle [79]



The methodology is typically applicable to structural products from the recreational products industry (*frames, handlebars, forks, bumpers, etc.*) for which a detailed study of their service life is required. For illustration purposes, the various steps of the proposed methodology will be applied to the design of a new, lightweight frame, for the tricycle shown in figure 107 [86-88]. However, it should be noted that the quantitative data used in the remainder of the paper have been roughly estimated and hence, do not accurately represent the reality. Consequently, the authors have no responsibility for the misuse of these data. Using the quantitative data in any other projects could lead to products that do not respect some design criteria.

### 2.1) Load cases identification stage

As shown in the methodology, there are activities related to the validation process that can be made at the detailed design stage or earlier. For example, several tools for gathering load-cases data can be used before criteria analysis can be addressed. Generally speaking, three types of data acquisition methods have been identified: (1) virtual method (*simulated loads*), (2) experimental method (*service loads*) and (3) benchmarking methods (*equivalent loads*).

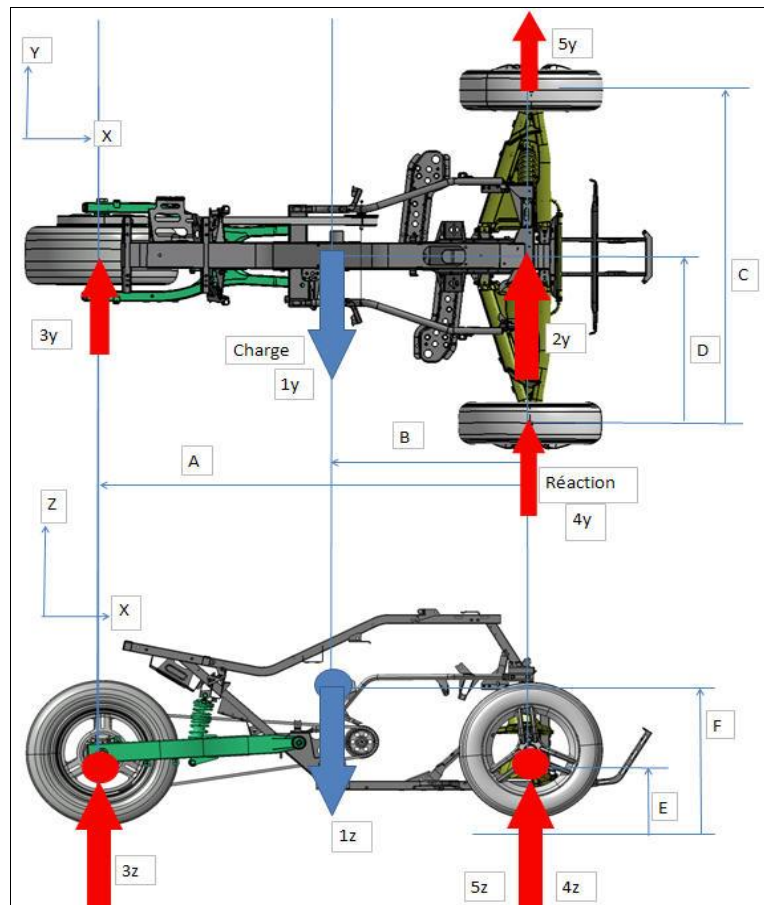


Figure 107: Free-body diagram of the vehicle frame of reference

In the way of virtual methods, simulation software may be used to determine the dynamic loads on a product under certain conditions of speed, etc. In parallel, an analytical calculation of the actual loads can also be performed (figure 107).

For instance, we assume that during a ride a transfer of loads between the front wheels occurs when the pilot turns the handlebar to the left or to the right. Hence, if the pilot attempts a change of direction along a circular path of radius  $R_g$  with a speed  $V$ , the rotation of the handlebar will cause the wheels to steer via the steering system. Accordingly, the steering of the front wheels will generate the lateral forces  $F_{4y}$  and  $F_{5y}$  called drift, which give rise to the lateral acceleration  $\gamma_t$ :

$$\gamma_t = \frac{V^2}{R_g}$$

The loads distribution for a typical lateral solicitation (*turning*) is shown in figure 107. Centrifugal force  $F_{1y}$  was decomposed following reactions  $F_{3y}$  and  $F_{2y}$ . The transversal force  $F_{2y}$  was also decomposed into  $F_{4y}$  and  $F_{5y}$ , due to the effect of transferring loads between the front wheels. The loads calculations were performed for an acceleration of  $\gamma_t = 0,5g$ .

The results of these analytical calculations of loads are summarized in table 19.

**Tableau 19: Typical load cases for a recreational vehicle**

| Load axis      | F1 (N)      | F2 (N) | F3 (N)       | F4 (N)       | F5 (N)       |
|----------------|-------------|--------|--------------|--------------|--------------|
| Y              | 3448        | -1817  | -1631        | -1289        | -528         |
| Z              | 6894        | -3633  | -3261        | -2578        | -1055        |
| Turning        | <b>7708</b> | -4062  | <b>-3647</b> | <b>-2882</b> | <b>-1180</b> |
| Braking        | -           | -      | <b>-2160</b> | <b>-3720</b> | <b>-3720</b> |
| Braking + bump | -           | -      | <b>-5000</b> | <b>-5236</b> | <b>-5236</b> |

Using the experimental method, data acquisition is made with strain gauges, applied to existing vehicles that have been developed either within the organization or among competitors [89]. This type of method allows multidisciplinary teams to understand the behavior of the structure under actual load conditions.

To determine the desired lifetime of a product, a spectrum of load cases must first be identified [90]. Thus, for the vehicle whose frame is depicted in figure 107, the number of cycles for each loading case was established by performing a ride along a 10 km road with several bumps,



curves and potholes. Considering that the studied vehicle is seasonal, an estimated service life of 50 000 km has been arbitrarily chosen. All data regarding the occurrence of the various load cases were collected in the field and compiled in table 20.

**Tableau 20: Lifetime estimation for a recreational product**

| <b>Lateral loads</b><br>(cycles) | <b>Braking</b><br>(cycles) | <b>Braking + Bumps</b><br>(cycles) | <b>Covered distance</b><br>(Km) | <b>Lifetime estimation</b><br>(Cycles) |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|
| 35                               | 25                         | 25                                 | 10                              | 85                                     |
| 35000                            | 25000                      | 25000                              | 10000                           | 85000                                  |
| <b>175000</b>                    | <b>125000</b>              | <b>125000</b>                      | 50000                           | 425000                                 |

The benchmarking method uses data available from component suppliers or other sources, such as feedback provided by the dealers following up on the repairs during the warranty period, etc. These data could also have been estimated using one of the two previous methods outlined above (*virtual and experimental methods*) or following the analysis of a failure that could have occurred during the service life of the product.

Thus, at the end of this step of the PDP, different load cases are identified and a product lifetime is estimated.

## **2.2) Criteria analysis stage**

The data obtained at the load cases identification stage will be used to model, analyze and validate the product with respect to all design criteria:

- 1<sup>st</sup> rank quantitative criteria (*structural criteria*);
- 2<sup>nd</sup> rank quantitative criteria (*economic criteria*);
- Qualitative criteria (*design for X criteria*).

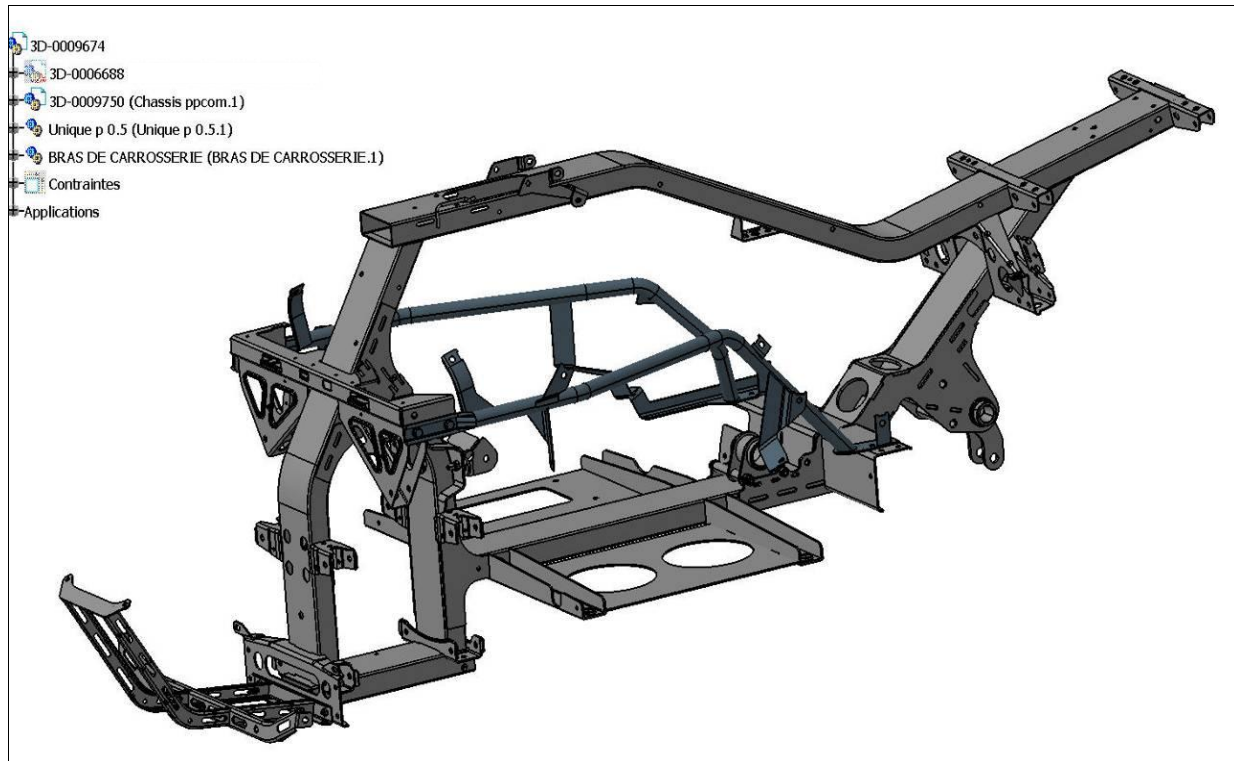
### **1<sup>st</sup> rank quantitative criteria (*structural criteria*)**

As illustrated in figure 106, the analysis of the quantitative criteria of 1<sup>st</sup> rank represents the earliest activity at this stage of the PDP and its result will be a virtual prototype (DMU). The main activities carried out at this stage are the computer aided modeling of the geometry and the analysis of several candidate materials using finite element simulations. These activities can be carried out iteratively and they aim to analyze the product's ability to withstand the loads identified in the upstream steps.

Hence, for the tricycle example, three frame concepts and one reference frame were modeled and preliminary analysis by finite elements were carried out in the ANSYS environment for each combination of geometry/material to verify their behavior under the action of the load cases identified earlier in the PDP.

More specifically, the following combinations of geometry/material have been investigated: planar optimized steel frame (Concept I), planar aluminum frame (Concept II) and «space» aluminum frame (Concept III).

Figure 106 illustrates the DMU of Concept I frame which has been designed and analyzed at this stage of the PDP.



**Figure 108: Roadster planar frame concept [10]**

Table 21 provides a comparison between the proposed concepts, according to different design criteria: stress, deflection and yield strength based safety factor. Comparison between the safety factor of the reference frame and those of the new concepts, shows the extent of the optimization that has been performed at this early step of the PDP.

Tableau 21: Functional concepts comparison

| Design Criteria         | Reference | Concept I | Concept II | Concept III |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|
| <b>Stress (MPa):</b>    |           |           |            |             |
| Braking                 | 140       | 150       | 125        | 155         |
| Lateral loads           | 200       | 250       | 160        | 180         |
| Braking + Bumps         | 170       | 240       | 190        | 145         |
| <b>Safety factor:</b>   |           |           |            |             |
| Braking                 | X         | -26,5 %   | -31 %      | -55,5 %     |
| Lateral loads           | X         | -26 %     | -10,5 %    | -19 %       |
| Braking + Bumps         | X         | -31,5 %   | -32 %      | -11,5 %     |
| <b>Deflection (mm):</b> |           |           |            |             |
| Braking                 | 2.1       | 2.6       | 4.4        | 2.6         |
| Lateral loads           | 3.1       | 6.1       | 7          | 9.2         |
| Braking + Bumps         | 2.9       | 4.4       | 6.35       | 3.7         |

This step must be completed before beginning the analysis of the quantitative criteria of 2<sup>nd</sup> rank because the cost analysis or weight determination of a product is not possible without identifying first some solutions combining the two main design variables: the geometry and the material.

### 2<sup>nd</sup> rank quantitative criteria (*economic criteria*)

In the second step of the criteria analysis stage, designers are interested in the product's ability to respect other quantitative criteria related to the competitiveness of the product on the market such as its cost, weight or volume.

These criteria are closely linked and depend on the product geometry and material choice. Iterations back to the previous steps are also possible and even desirable in some cases to identify more relevant combinations (*geometry/material*) that meet all quantitative criteria (*1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> rank*).

To determine the profitability of the product, the cost analysis should cover all those activities of the PDP that involve expenditures (*design/validation, manufacturing, maintenance, recycling, transportation, storage, etc.*). In our case, the third concept didn't meet the cost criterion in terms of dollars invested per kg saved and consequently, it was discarded (see table 22).

**Tableau 22: Results of economic criteria analysis [10]**

| Concepts          |            | Reference | I     | II      | III     |
|-------------------|------------|-----------|-------|---------|---------|
| Weight            |            | X (kg)    | -14 % | -61 %   | -73 %   |
| Raw material cost | Cost/m     | X (\$)    | -27 % | +8 %    | -68 %   |
|                   | Meters     | X (m)     | -0 %  | -0 %    | +155%   |
|                   | Total cost | X (\$)    | -27 % | +9 %    | -19 %   |
| Processes cost    | Folding    | X (\$)    | -0 %  | +28,5 % | +151%   |
|                   | Welding    | X (\$)    | -0 %  | +32,5 % | +130,5% |
| Cost difference   |            |           | -18%  | +12%    | +37%    |

Thus, an inconclusive result for such an analysis could lead to stop the project or to search for alternatives (*removal of a production chain, outsourcing tasks to suppliers, etc.*).

#### **Qualitative criteria (*design for X criteria*)**

Moreover, a qualitative criteria analysis is imposed at the detailed design phase to verify whether a product meets the non-quantifiable requirements established at the preliminary design phase. Ergonomics, aesthetic and manufacturability are part of this category of design criteria and their analysis will provide designers a feedback on customer needs and on the conceptual choices made accordingly.

Considering that the first concept (steel optimized planar frame) is very similar to the existing frame regarding its assembly, tooling and "friendliness" toward engine maintenance, the engineering team has decided to develop this concept and to move on to the preliminary steps of the validation stages.

Nonetheless, depending on the customer needs, or product specifications, several iterations may be initiated on the geometry or material of the product, always in line with the quantitative criteria analyzed in the previous steps as well as the qualitative one addressed in this section.

### **2.3) Numerical validation**

To prove its relevance, the proposed approach was applied to the reference frame which is already on the production line. As a first step of the structural validation of the product, a finite element analysis (FEA1) was performed using the values identified at the load cases evaluation step. After determining the maximum stress that can be supported by the frame while ensuring the desired service life of the product, a second finite element analysis (FEA2) is necessary to

simulate the product on a virtual testing machine along with the forces to be applied by the machine onto the frame.

### 2.3.1) Finite Element Analysis of the structure with the actual loading conditions (FEA1)

The properties of the chosen material are used at this step to determine the maximum allowable stress in the critical sections of the product for a desired service life (*see the box «finite element model of the structure» FEA1*). In the case of materials for which no S/N curves are available, a safety factor will be required to account for the estimated service life of the product. Figure 109 shows an estimated S/N curve for the steel grade used in the reference frame. Thus, according to the curve, for a lifetime of 425000 cycles, the maximum stress should not exceed 260 MPa in the critical zones.

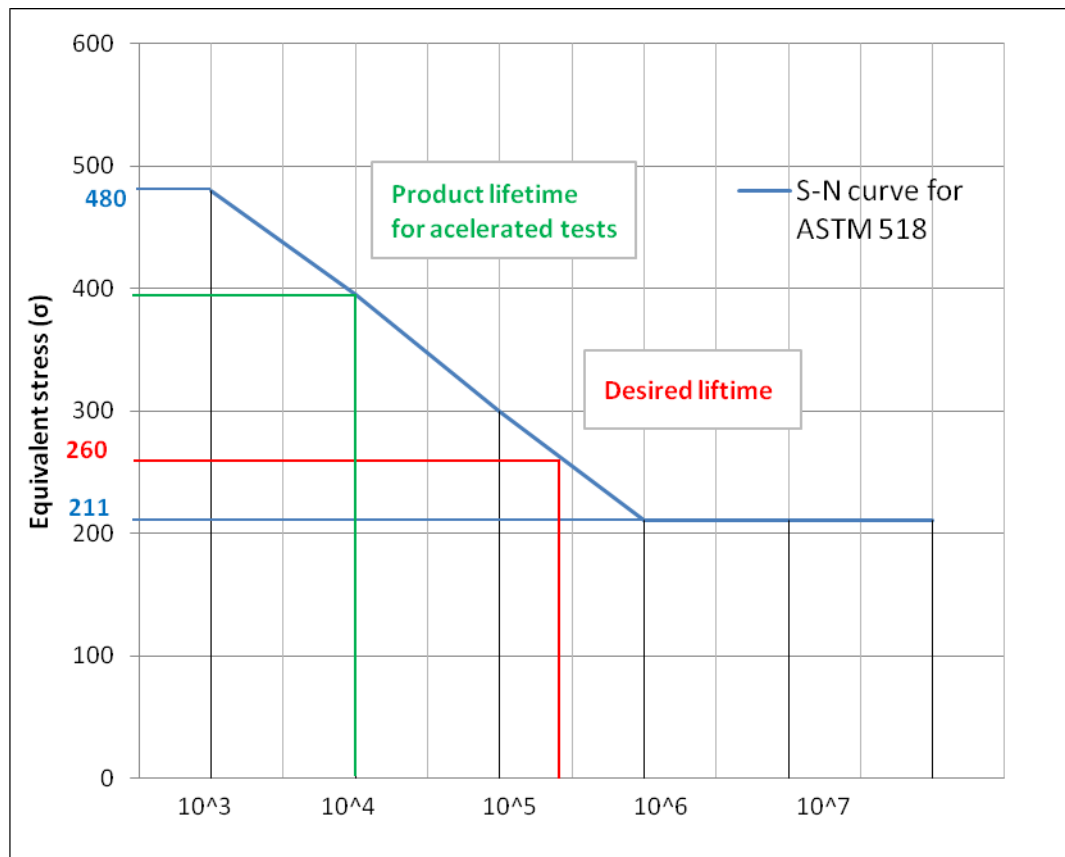
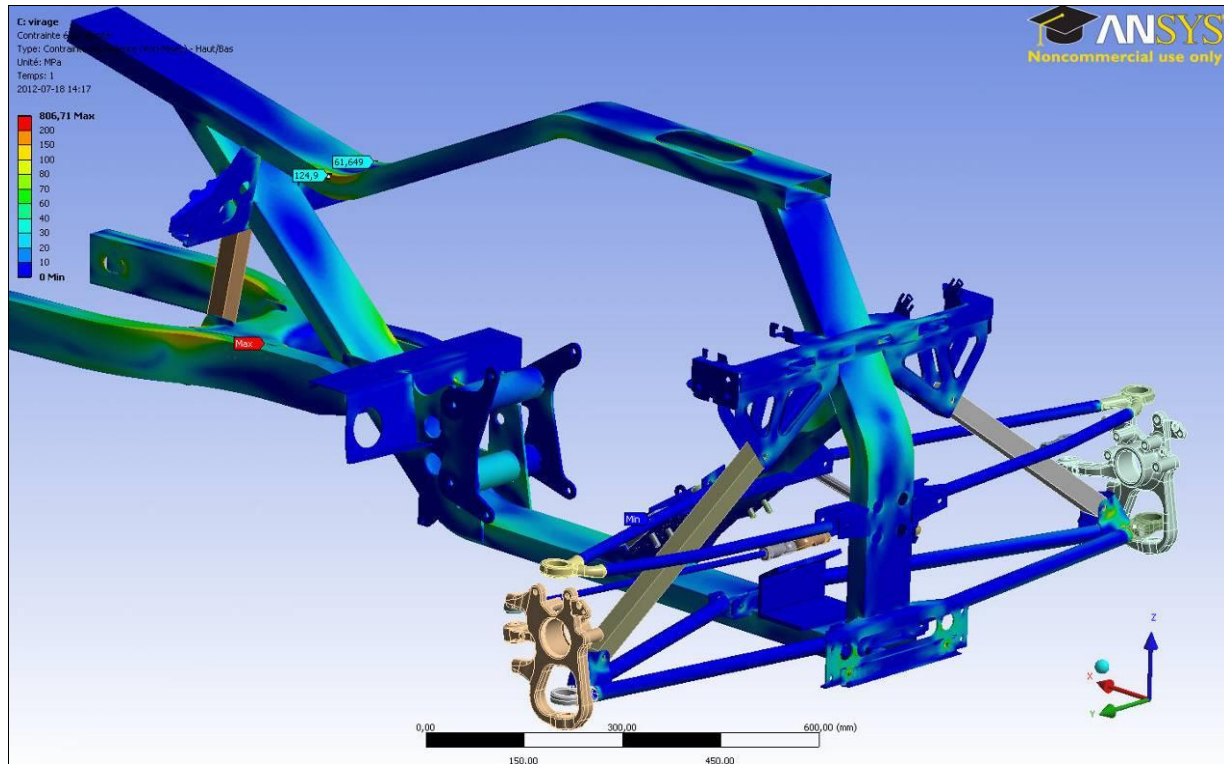


Figure 109: S/N curve estimation for the ASTM 518 steel [80]

After several iterations performed at the FEA1 step, an optimal combination of geometry and material was generated. Once a geometric and topological optimization was completed for the datum frame, a calculation of its service life was also performed using the S/N curve of the ASTM 518 steel grade (figure 109).

During the FEA1 analysis (figure 110), it was established that the highest stress calculated for the structure of the reference frame (175MPa) did not exceed the endurance limit of the material.



**Figure 110: Finite element simulation of the frame with the actual loads (FEA1)**

This meant that the reference frame should have an infinite life under normal operating conditions. Thus, a second finite elements analysis is required to establish the forces that would induce a fracture into the structure.

### **2.3.2) Finite Element Analysis of the structure with the laboratory loading conditions (FEA2)**

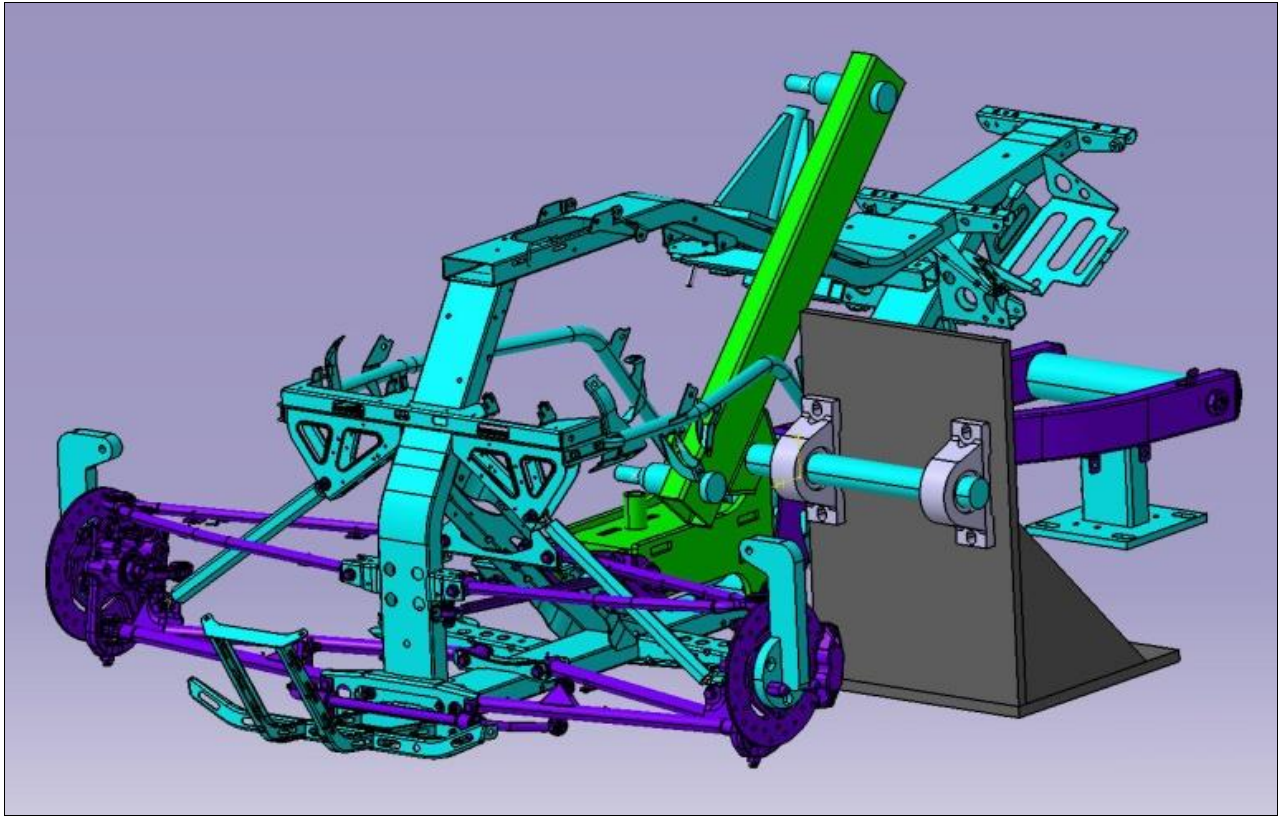
With the finite element simulation of the product under laboratory tests conditions (FEA 2), the loads applied by the testing machine should produce the same stresses in the critical sections of the product as when using the service loads that were simulated in the previous step (FEA 1).

To that end, a digital mockup (DMU) of the mounting jig and frame was designed and modeled as shown in figure 111.

By calculating the loads to be applied on the testing machine, the engineers will also be able to identify the corresponding loads for a predicted service life in an accelerated test (*see the box «finite element model of the structure for laboratory tests» FEA 2*).

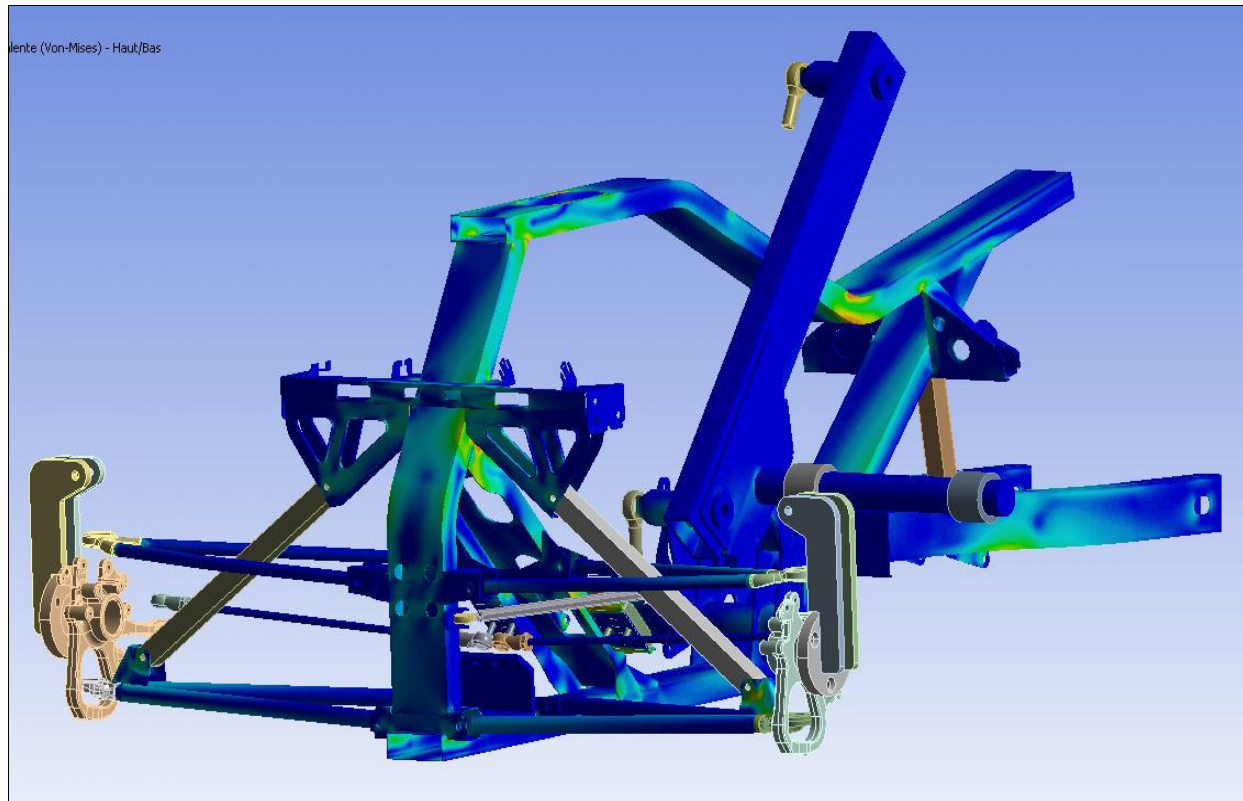


Given the fact that the maximum stresses induced in the structure by the real service loads were under the endurance limit, it was decided to increase the forces in each load case to allow failures to appear.



**Figure 111: The mounting jig and frame on the testing machine (DMU)**

As shown in figure 112, several points of interest were identified and compared to the results of the first simulation (FEA 1). Therefore, simulation analysis FEA 2 allowed the engineering team to find the actuator forces that would induce a structural failure after the predicted lifetime of 425000 cycles. From this, a safety factor can be calculated from the ratio between the yield strength of the material and the stress induced by the actuator forces (determined for the desired lifetime).



**Figure 112: Finite element simulation of the frame on the testing machine (FEA2)**

The safety factor thus calculated can subsequently be used as criterion for the preliminary dimensioning of structural parts regarding service life. It should be kept in mind that this assembly (*chassis + jig*) must be designed in such a way that it should replicate as closely as possible the actual load cases. It can be seen in figure 112 (FEA2) that the loaded zones are indeed very similar to those from figure 110 (FEA1).

In table 23, the results of this second simulation are presented for the critical points of the frame. However, it should be noted that, for confidentiality and liability issues, these points are not explicitly shown on figures 110 and 112.

Nonetheless, these steps of finite element simulations constitute the preliminary validation of the product (*virtual dimension*) and they will be followed by experimental and field tests (*physical dimension*), to verify the correspondence between the numerical prediction of the product life and the results of the physical tests.



**Tableau 23: Results of the numerical simulation (FEA2) on the reference frame**

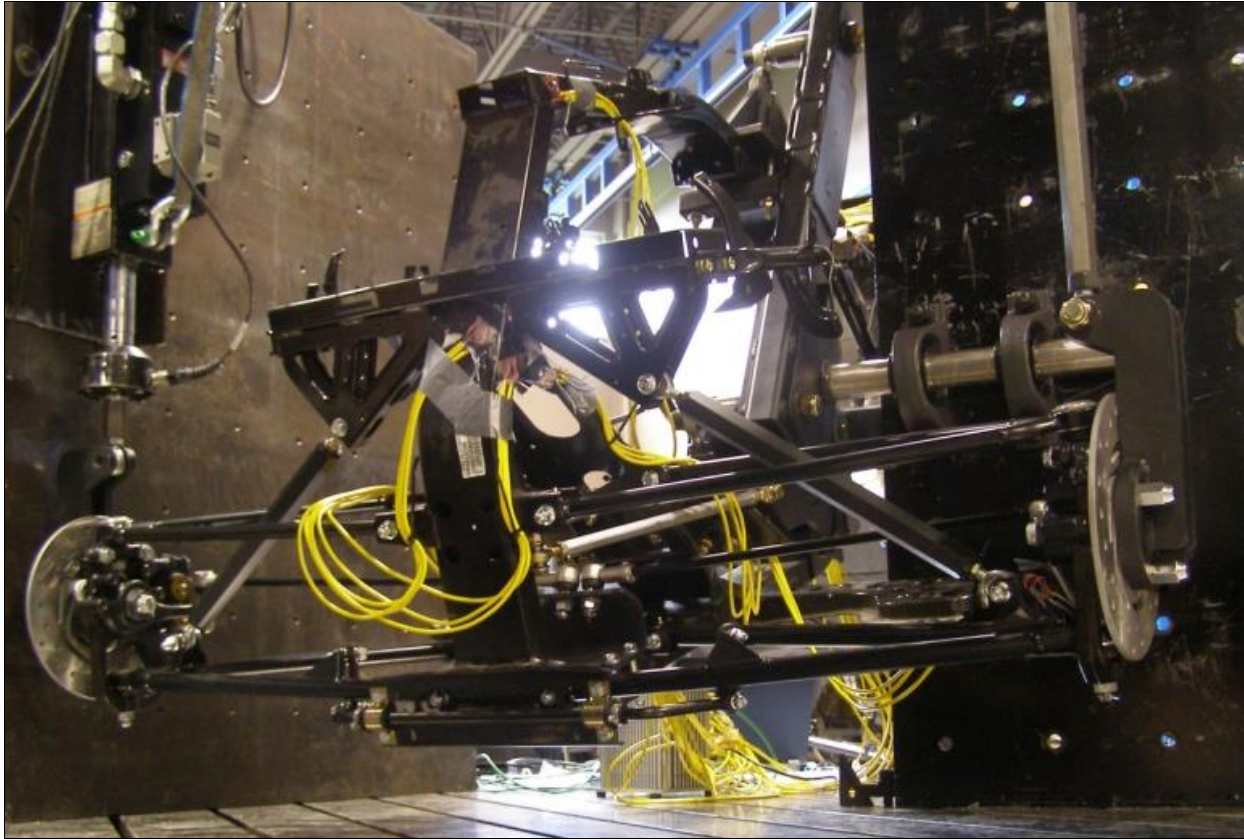
| Control points | Braking + Bumps | Braking        | Turning        |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|
|                | $\sigma$ (Mpa)  | $\sigma$ (Mpa) | $\sigma$ (Mpa) |
| P1             | 130             | 98             | 141            |
| P2             | 86              | 80             | 126            |
| P3             | 141             | 95             | 100            |
| P4             | 135             | 118            | 169            |
| P5             | 114             | 82             | 174            |
| P6             | 192             | 185            | 195            |
| P7             | 213             | 188            | 185            |
| P8             | 201             | 198            | 242            |

#### 2.4) Experimental Validation

The laboratory tests involve the application of the cyclic loads calculated at the FEA2 stage by the actual testing machine. These tests are used to validate the predicted life of the product and the estimated S/N curve of the chosen material. After performing several iterations at the numerical simulation step (FEA2), a physical prototype was installed and instrumented on the machine table, as shown in figure 113.

The forces applied by the actuators depend on the type of test. The validation method allows us to perform extensive tests (*based on the desired lifetime of the product*) as well as accelerated tests (*10000-50000 cycles*).

The first step of this experimental stage was to identify the critical areas of the frame and the appropriate way to install the strain gauges (*orientation, position, surface cleaning, protection, etc.*).



**Figure 113: The mounting jig and frame on the tests machine (Physical prototype)**

Two software were used as tools to monitor the frame. These were TCE\_v3.15 and EASE 3. A data acquisition system e-DAQ with 28 channels (*24 connected to the gauges and 4 connected to the control system of the testing machine*) was used to measure the equivalent stresses at the critical areas previously identified. The additional channels had been reserved to record the values of the applied forces and the actuators displacement.

Indeed, the control system of the testing machine was connected to the e-DAQ system and the values of strains, stresses, displacements and forces were recorded synchronously and in the same data acquisition file. Figure 114 illustrates these data for the most severe load case applied to the frame assembly, featuring a combination of both flexion and torsion.

The structure was attached to the testing machine table at  $25^\circ$  in order to replicate the diving angle of the vehicle while braking. Before starting the test, it was necessary to ensure that the forces, applied by the actuators, were inducing into the structure the same stresses as those which were calculated at the FEA2 step. For this purpose, the calibration of all the gauges was necessary, followed by the verification of the stress values in the critical zones.

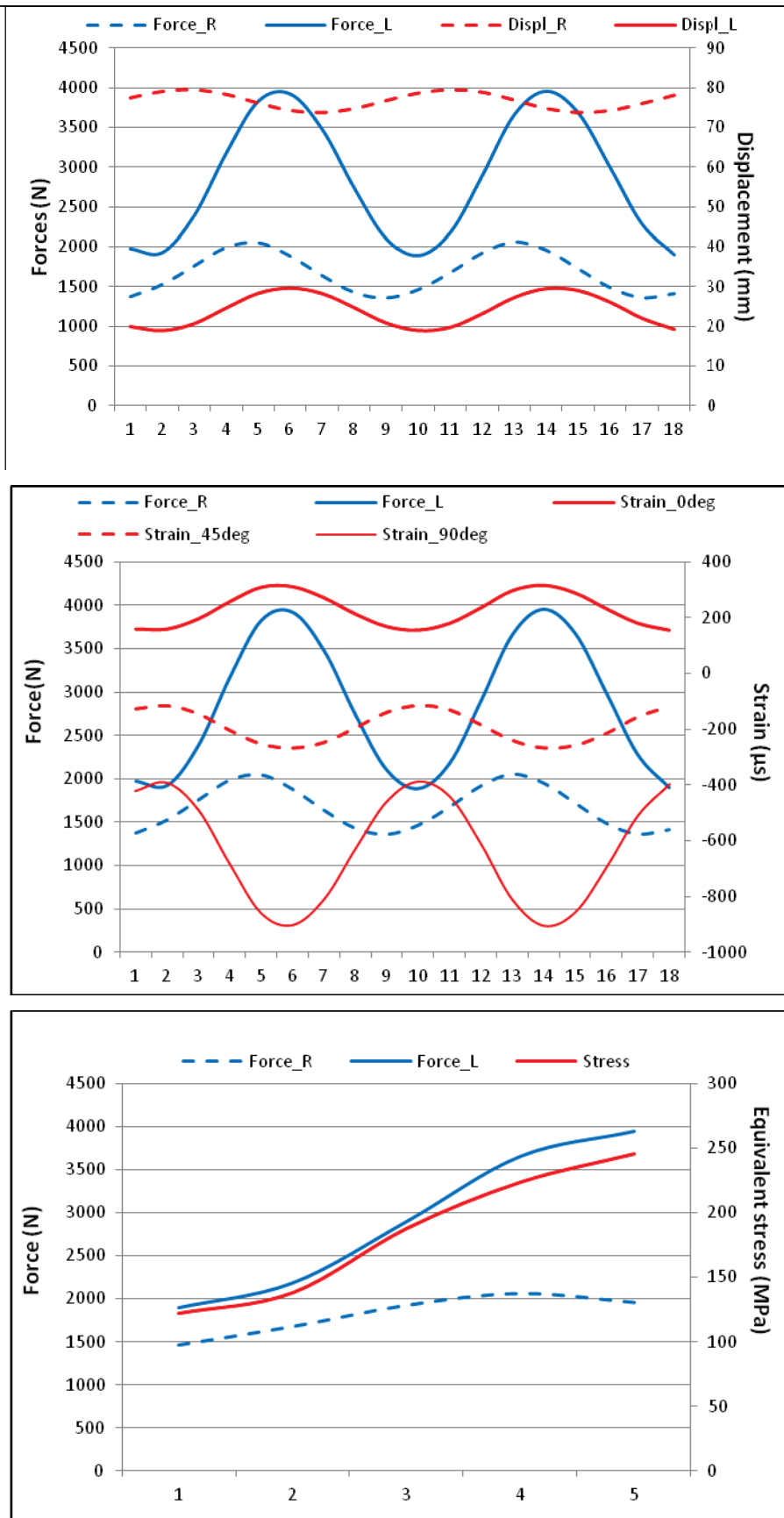


Figure 114: Fatigue parameters from the acquisition data system e-DAQ

The calculation of the equivalent stress was performed using Hooke's, von Mises and Goodman's formulas as follows:

- To determine the internal deformation, the normal stresses and the shearing stresses, Hooke's formulas were employed (1 to 6),

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_a + \varepsilon_c + \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_a + \varepsilon_c - \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2(1-\theta^2)} \left[ (1+\theta)(\varepsilon_b + \varepsilon_c) + (1-\theta)\sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2(1-\theta^2)} \left[ (1+\theta)(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - (1-\theta)\sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1+\theta)} \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \quad (6)$$

- To determine the equivalent stress, von Mises formulas were employed (7 to 10),

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_{eq-a} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{eq-m} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau^2} \quad (10)$$

➤To determine the completely reversed equivalent stress, Goodman's formula were employed (11):

$$\sigma_{eq-CR} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (11)$$

The calculation of the completely reversed, equivalent stress is necessary to predict the service life of the structure using the S/N curve. Since the S/N curves are determined through the application of an alternating and completely reversed stresses (tension/compression) applied to several specimens of standard sizes, Goodman's formula proved to be the best suited analytical tool for the calculation of the equivalent stress.

As predicted, the experimental test results have shown that the service life of the steel, reference frame is infinite and consequently, the structure is overdesigned. Indeed, after 425000 cycles the structure was still intact and functional. A structural failure eventually occurred after drastically increasing the applied forces above the upper limit of the initial load cases.

Table 24 shows the results of each stress analysis step for the reference point P8 (the most critical) on the datum frame. Thus, a comparison of these stress values allows an accurate evaluation of the structure while giving an idea of the robustness of the frame. In this case, the results of the experimental tests provide the confidence to further optimize the structure with respect to the weight reduction criteria.

**Tableau 24: Stress calculations results for the critical point P8, at different stages of the PDP**

|                        | FEA_1   | FEA_2   | Experimental tests |
|------------------------|---------|---------|--------------------|
| <b>Braking + Bumps</b> |         |         |                    |
| <b>P8</b>              | 172 MPa | 201MPa  | 232 MPa            |
| <b>Braking</b>         |         |         |                    |
| <b>P8</b>              | 168 MPa | 198MPa  | 210 MPa            |
| <b>Turning</b>         |         |         |                    |
| <b>P8</b>              | 185 MPa | 242 MPa | 240 MPa            |

In the end, it should be remembered that the reference frame yielded after several spectrums of loads that far exceeded the actual forces acting on the structure under normal conditions of use.

This confirms the findings presented in Table 21. In any case, a further reduction of the design safety factor could be considered, while still respecting the mechanical criteria.

### **2.5) Physical Validation**

Before the beginning of the production phase, physical tests are needed and some specific procedures are implemented. Physical tests are very expensive because they involve full scale infrastructures with professional test pilot riding on new vehicles assembled either in the prototype workshop or as small pilot run on the production line. However expensive this phase may be, it cannot be circumvented, as it provides a comprehensive feedback loop on the product and its specifications from a vehicle behavior and resistance point of view.

Finally, the ultimate validation of the product will be performed by the client himself (*client validation*) to ensure that its needs and the product specifications are fully satisfied. In this context, the client could provide his opinion of the product, relating to the design criteria of the manufacturer or designer, without being able to directly compare the new product with some competitor's products (*in this case we are talking about an absolute validation approach*). On the other hand, the client could also express his opinion relative to competing products which are available on the market (*in this case we are talking about a relative validation approach*).

### **3) Contributions of the approach to the Product Development Process**

This paper is dedicated to the formalization and integration of design and validation activities at the detailed design phase of the design process. More specifically, the proposed methodologies focused on optimizing the service loads, the material and the geometry of the parts designed to be used on recreational products. Thus, in what follows, are outlined some contributions of the proposed methodology in both academic and industrial fields. Thus, in the academic field the new approach:

- Allows the design teams to reduce the time allocated to the detailed design process and to increase the accuracy of the product validation;
- Represents a very useful methodology and tool for training undergraduate students in mechanical engineering while improving the communication among the actors (*professors and students*) involved in undergraduate and postgraduate projects.

From another perspective, regarding the recreational product industry, four benefits from the proposed methodology have been identified:

- It provides a graphical planning tool (*Workflow*) for the various steps of the PDP, from the detailed design activities to the product's final validation;

- It allows the allocation of human, material and financial resources at different stages of the detailed design phase of the PDP;
- It makes it easier to communicate design and validation methods amongst various members of the organization (*managers, new engineers, technicians, etc.*);
- Its iterative nature allows the correlation between the actual loads, the results of finite element simulations and the results of the experimental validation.

Moreover, the graphical representation of the different design stages will significantly facilitate the designers' tasks into the PDP, with the aim of reaching the ultimate objective of this process: product validation through numerical simulation and experimental testing. With the proposed approach, the product design and validation activities will also be conducted in accordance to the state of the art in the product development field (resources, methods and knowledge) to avoid both overdesign and poor design.

The sources of information for the detailed design activities which have been formalized in this paper include design codes and formulas, handbooks, and component specifications from suppliers.

#### 4) Conclusions

In the prescriptive design and validation methodology presented in this paper, iterations play a very important role in determining the material, shape and size of the new product or component. This implies the initial selection of a material, shape and size for a model, with the hope that the design criteria can be met and that strength, life and safety goals will all be achieved after successive controlled improvement to the initial proposition.

Another important aspect to be taken into account by the designers is that of «design for X» where X is an attribute such as manufacturing, reliability, recycling, environment, etc. Since most products are designed to be built, sold, used and then disposed of, these attributes were collectively integrated in the proposed methodology as qualitative design criteria.

Moreover, the formalization of the PDP renders the design steps performed by the multidisciplinary teams much more explicit and better documented. Thus, the proposed methodology is very helpful for a good communication amongst all three parties in the **designer-manager-user** triangle, in which tasks such as analyzing, modeling, testing, evaluating, and optimizing are performed.

The most important goal that was reached with this approach is the correlation between the results of the load cases identification phase, numerical simulations phases (FEA1 & FEA2), and

the experimental tests. This is also representing an original way to design, optimize and validate the product without overdesigning it and at the same time avoiding a poor design.

Future research activities will include:

- Integrating the proposed approach for other recreational products with the aim of improving the structural components of the vehicles;
- Developing more specific methodologies to eventually cover all areas of engineering (*propulsion, direction, braking, body or electrical system*), and to support multidisciplinary teams as they improve and validate their designs.
- Integrating the proposed design and validation methodologies into the mechanical engineering curriculum at the Université de Sherbrooke (QC) with the aim of supporting and improving design education.

Finally, design and validation methodologies such as the one outlined in this paper, may also be a valuable tool in design learning as it could show students the work of experienced engineers and help them reflect on their own design processes.

#### **Acknowledgements:**

The research presented in this paper was supported by a grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada which the authors sincerely thank for its valuable support.



# LISTE DES RÉFÉRENCES

- 1.Ullman D. G. (1992), *The mechanical design process*, New York: McGraw-Hill.
- 2.Otto K. et Wood K. (2001), *Product Design*, New Jersey: Prentice Hall.
- 3.Dym L. C. et Little P. (2009), *Engineering Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, INC.
- 4.Ulrich K., et Eppinger S. (1995). *Product design and development*, New York: McGraw-Hill.
- 5.Cross, N. (2000), *Engineering Design Methods-Strategies for Product Design*, Chichester, England, New York: Wiley.
- 6.Cooper G. Robert (1993), *Winning at New Products. Accelerating the process from Idea to Launch*, Cambridge Massachusetts: Perseus Books
- 7.Jones C., Ertas A., (1993), *The Engineering Design Process*, New York: John Wiley& Sons, Inc.
- 8.Pahl G., Wallace K. et Blessing L. (2007), *Engineering design: a systematic approach*, London: Springer.
- 9.Denis Proulx, François Charon et Patrik Doucet (2002), *IMC156-Notes de cours*, Université de Sherbrooke, Département de génie mécanique
- 10.Curran R, Gomis G, Castagne S., Butterfield J., Edgar T., Higgins C., McKeever C. (2007), *Integrated Digital Design for Manufacture for Reduced Life Cycle Cost*. International Journal of Production Economics 109(1-2): 27-40.
- 11.Boothroyd G. et Dewhurst P. (1986), *Les assemblages: comment optimiser leur conception*. Sinles : CETIM
- 12.Berger J. et Orriols M. (1991), *Conception des produits pour l'assemblage automatisé*, Paris : CETIM (Centre technique des industries mécaniques)
- 13.Contero M., Vila C., Aleixios N. (2002), *Product Data Quality and Collaborative Engineering*, IEEE Computer Graphics and Applications 22(3): 32-42.
- 14.Boothroyd G. (2002), *Product Design for Manufacture and assembly 2<sup>nd</sup> ed. rev. and expanded*, New York: Marcel Dekker.
- 15.Hatamura Y. (2006), *Decision-making in engineering design (ressource électronique) Theory and Practice* Berlin, London: Springer.

16. Pugh, S. (1991) *Total Design-Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Wokingam, England, Reading, Mass.: Addison-Wesley.
17. Jagon P. (1993), *Concurrent Engineering la maîtrise de coûts, des délais et de la qualité*, Paris : Hermès.
18. Kusar J., Duhovnik J. (2004), *How to reduce new product development time*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana; *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing* (20).
19. Suri R, Frei DD, Otto KN (2001), *Key Inspection Characteristics*, *Journal of Mechanical Design* 123(4): 479-485.
20. Saaksvuori A. et Immonen A. (2004), *Product Lifecycle Management*, Berlin : Springer.
21. Seider, Warren, D. (2009), *Product and process design principles: synthesis and evaluation*, Hoboken, NJ: John Wiley.
22. Memary R. (2009), *Using cost analysis as a tool for combining design for assembly and design for disassembly at the early stage of sustainable product development process*. University of Malaysia-Conference on Innovation and Practices in Engineering Design and Engineering Education.
23. Vanderlaan J., Doyle T. (2009), *Reverse engineering*, Mc Master University-Conference on Innovation and Practices in Engineering Design and Engineering Education.
24. Yannon B., Dihlmann M., Awedikian R. (2008), *Evolutionary design of car silhouettes*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
25. Gaylord, Edwin H. (1957), *Design of steel structures including applications in aluminum*, Toronto: McGraw-Hill.
26. Kyoung-Yun Kim, Keunho-Choi (2008), *Rough-Set Based design rule selection for collaborative assembly design*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
27. Spensieri D., Bohlin R., Johan S. Carlson, Söderberg R. (2008), *Integrating assembly design sequence optimization and advanced path planning*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
28. Veux G. (2005), *Développement d'une méthodologie d'analyse par éléments finis pour la conception en fatigue de structures soudées-Mémoire de maîtrise*, Université de Sherbrooke.
29. Suh P. Nam, (1990), *The principles of Design*, New York; Oxford : Oxford University Press.
30. Aiman Z., Fouzia B., *Course Design Using Axiomatic Theory*, Canadian Engineering Education Association Conference, Kingston Ontario, Queen's University: 6-9 June 2010.

31. Gauthier F. (1997), *Développement d'une méthodologie de conception permettant l'intégration systématique des aspects de la santé et de la sécurité du travail dans le processus de conception d'outils, des machines et de procédés industriels*-(thèse), Université de Sherbrooke-Sciences Appliquées.
32. Crowson R. (2006), *Product Design and Factory Development*, Boca Raton, Fla.: CRT/Taylor & Francis.
33. Degallaix S., Boussuge M. et Ilschner B. (2007), *Caractérisation expérimentale des matériaux I : Propriétés physiques, thermiques et mécaniques*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
34. Huang W., Kong Z., (2008), *Process Capability Sensitivity Analysis for Design Evaluation of Multi Station Assembly Systems*, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Washington DC, USA 400-405.
35. Ceglarek D., Shi J., (1996), *Fixture Failure Diagnosis for Autobody Assembly Using Pattern Recognition*. ASME Transaction Journal of Engineering Industry 118(1), 55-66.
36. Selariu M. (1993), *Solutiile unor Sisteme Mecanice Neliniare-Supermatematica*, Com. a VII-a Conf. Nat. V.C.M., Timisoara, 1993, pag. 275-284.
37. East W., Kirby J., Liu L., (2008), *Verification and Validation of a project collaboration tool*. Automation in Construction 17, 201-214.
38. Maropoulos P.G., Ceglarek D. (2010), *Design verification and validation in product lifecycle*, CIRP Annals-Manufacturing Technology 59.
39. Bouhelier C. (1989), *Mécanique de la rupture : seuil de propagation des fissures par fatigue*, Senlis, France : CETIM
40. Pook, L. P. (2007), *Metal fatigue*-(ressource électronique): *what it is, why it matters*, Dordrecht: Springer.
41. Madayag, Angel F. (1969), *Metal fatigue: theory and design*, Toronto: Wiley.
42. Lemay É. (1995), *Intégration de l'analyse fonctionnelle à un processus de réalisation de produits selon l'approche de l'ingénierie simultanée*-thèse, Université de Sherbrooke-Génie mécanique.
43. Kolb J. et Ross Steven S. (1980), *Product safety and Liability: A Desk Reference*, New York: McGraw-Hill.
44. Popovici D. et Vlacic L. (1999), *Mechatronics in engineering design and product development*, New York: Marcel Dekker.

- 45.Quarante D. (1994), *Éléments de design industriel*, préface de la 1ere édition : Guy Danielou, Paris : Polytechnica.
- 46.Kamyab A., Lewis E. (2008), *Customizing products using functional component matrices*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
- 47.Vajna S., Burchardt C. (1998), *Dynamic Development Structures of Integrated Product Development*, Journal of Engineering Design, Vol. 9, Nr. 1.
- 48.Rahman A., Baksh N. (2003), *The need for a new product development framework for engineers*, European Jurnal of Innovation Management, Vol. 6, Nr. 3.
- 49.Kuo T-C, Huang SH, Zhang SH (2001), *Design for Manufacture and Design for X: Concepts, Applications and Perspectives* Computers and Industrial Engineering 41(3): 241-260.
- 50.Dong A., Agogino A., (1995), *A Spectral Optimisation Algorithm for Multi-Objective Prototype Selection*, Design Engineering Technical Conferences, Vol. 2:447-454, ASME.
- 51.Tomiyama T., (1995), *A Design Process Model that Unifies General Design Theory and Empirical Findings*, Design Engineering Technical Conferences, Vol. 2: 329-340, ASME
- 52.Ullman D., D'Ambrosio B., (1995), *A Taxonomy for Classifying Engineering Problems and Support Systems*, Design Engineering Technical Conferences, Vol. 2: 627-637, ASME.
- 53.Eppinger S.D., Whitney D.E., Gebala D.A., (1992), *Organizing the Tasks in Complex Design Projects: Development of Tools to Represent Design Procedures*, Proceeding of NSF Design and Manufacturing Systems Conference: 301-309, Atlanta, Georgia.
- 54.Viswanathan K. (1996), *Managing the Simultaneous Execution of Coupled Phases in Concurrent Product Development*, IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT, VOL. 43, NO. 2, MAY.
- 55.Billatos B., Basaly, Nadio A., (1997) *Green Technology and Design for the Environment*, Taylor&Francis, États-Unis
- 56.Shalaby M., Saitou K. (2008), *High-Stiffness, Lock-and-key heat-reversible locator-snap systems for the design for disassembly*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
- 57.Kleyner A., Sandborn P. (2008), *Minimizing lifecycle cost by managing product reliability via validation plan and warranty return cost*, International Journal of Production Economics 112.
- 58.McMahon C., Meng X., Brown K., Williams J., (1995), *A Parallel Multi-Attribute Transformation Model of Design*, Design Engineering Technical Conferences, Vol. 2: 341-350, ASME.

59. Pandey V., Thurston D., (2008), *Metric for disassembly and reuse: Formulation and Validation*, Design Engineering Technical Conference, Brooklyn, NY, USA.
60. Juvinall C. R., Marshek M. C., (2012), *Fundamentals of Machine Component Design (5<sup>th</sup> edition)*, John Wiley & Sons, Inc., ISBN: 9781118012895 (2012).
61. Tacher M. (2012), *Conception d'un châssis de roadster hybride à trois roues-mémoire de maîtrise*, Université de Sherbrooke-Génie mécanique.
62. Pépin J.-F. (2008), *Development of a conversion methodology for structural parts from steel to aluminium-mémoire de maîtrise*, Université de Sherbrooke-Génie mécanique;
63. MTS Systems Corporation (2005), *MTS User Information and Software Reference*, Vol. 2, Manual Part Number 100-122-217 (2005).
64. Ben Romdhane W. (2011), *Développement d'un gabarit pour essai de fatigue sur le châssis d'un véhicule récréatif à trois roues-projet de développement*, Université de Sherbrooke, Faculté de génie
65. Budynas-Nisbet (2008), *Shigley's Mechanical Engineering Design (8<sup>th</sup> edition)*, McGraw-Hill's, 1054 pp. {ISBN 0-390-76487-6}
66. Burdekin F. M., (2007), *General principles of the use of safety factors in design and assessment*, Engineering Failure Analysis, pp. 420-430.
67. Castillo E, Losada MA, Mi'nguez R, Castillo C, Baquerizo A., (2003), *An optimal engineering design method that combines safety factors and failure probabilities. Application to rubble mound breakwaters*. J Waterways, Ports, ASCE 2003.
68. Cheol-Eung Lee, Seung-Woo Kim, Dong-Heon Park, Kyung-Duck Suh, (2011), *Target reliability of caisson sliding of vertical breakwater based on safety factors*, Coastal Engineering pp. 167-173.
69. Ching J., Hsieh Y., (2009), *Updating real-time reliability of instrumented systems with stochastic simulation*, Probabilistic Engineering Mechanics, pp. 242-250.
70. Clausen J., Hansson S., Nilsson F. (2006), *Generalizing the safety factor approach*, Reliability Engineering and System Safety, pp. 964-973.
71. Freudenthal AN. *Safety and the probability of structural failure*. Trans ASCE 1956; 121:1337-97.
72. Pradlwarter H. J., Schuëller G. I., Koutsourelakis P.S., Charmpis D. C., (2007), *Application of line sampling simulation method to reliability benchmark problems*, Structural Safety pp. 208-221.
73. Staab G., Busby H. and Collins J. A. (2010), *Mechanical Design of Machine Elements and Machines (2<sup>nd</sup> edition)*, New Jersey: John Wiley & Sons, 890 pp. {ISBN 978-0-470-41303-6}.

74. Vidosic, Joseph P. (1957), *Machine Design Projects*, Ronald Press, NY.
75. Ertas A. et al. (1989), *A Comparison of Fracture Mechanics and S-N Curve Approaches in Designing Drill Pipe*, ASME, OAOSP, PD-vol. 26, pp. 45-50.
76. Hwang C., Tsai C., Chang C., (2004), *Efficient Inspection Planning for Coordinate Measuring Machines*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 23(9-10):732-742.
77. Richard C. Rice, (1997), *SAE Fatigue Design Handbook*, Society of Automotive Engineering Inc., Warrendale PA.
78. Debbabi M., Hassaïne F. and Soeanu A. (2010), *Verification and Validation in Systems Engineering*, London New York: Springer
79. Iorga C. and Desrochers A., (2011), *Product Modeling, Evaluation and Validation at the Detailed Design Stage*, Canadian Engineering Education Association Conference (CEEAA 2011) St.-John New Found-Land & Labrador.
80. Ertas A. and al. (1989), *A Comparison of Fracture Mechanics and S-N Curve Approaches in Designing Drill Pipe*, ASME, OAOSP, PD-vol. 26, pp. 45-50.
81. Conle F. A. and Chu C. C., (1997), *Fatigue analysis and the local stress-strain approach in complex vehicular structure*, ELSEVIER, Int. J Fatigue, Vol. 19, pp. S317-S323.
82. Stauber R. and Baur M., (2000), *Advanced Material Technologies Meeting the Challenges of Automotive*, FISITA World Automotive Congress, Seoul Korea, 12-15 June 2000.
83. Fricke W., (2003), *Fatigue analysis of welded joints: state of development*, ELSEVIER, Marine Structures 16, pp.185-200.
84. Kadhim N. A., Abdullah S., and Ariffin A. K., (2011), *Effect of the fatigue data editing technique associated with finite element analysis on the component fatigue design period*, ELSEVIER, Materials and Design 32, pp.1020-1030.
85. El-Ratal W., Bennebach M., Lin X., and Plaskit R., (2002), *Fatigue life modeling and accelerated test for components under variable amplitude loads*, 10<sup>th</sup> International Spring Meeting of SF2M, Tours, France, 29-31 May 2002, pp.349-364.
86. Lee Y., Hathaway R., and Barkey M., (2005), *Fatigue testing and analysis (theory and practice)*, ELSEVIER Butterworth-Heinemann.
87. Choi Y., Yeo H. T., Park J. H., Oh G. H., and Park S. W., (2007), *A study on press forming of automotive sub-frame parts using extruded aluminum profile*, ELSEVIER, Journal of Materials Processing Technology 187-188, pp.85-88.

88. Lee D. C., and Han C. S., (2009), *Computer Aided Engineering driven durability model verification for the automotive structure development*, ELSEVIER, Finite Element in Analysis and Design 45, pp. 324-332.
89. Lee D. C., Jang J. H., and Han C. S., (2006), *Design consideration of a mechanical structure with geometric and material non-linearities*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part D, J. Automotive Eng. 220 (3), pp.281-288.
90. Joo S. G., You S. S., Joseph A. F., and Leser, (2003), *Integration of physical and virtual tools for virtual prototype validation and model improvement*, SAE 2003-01-2813.
91. Mogenot Y., (2013), *Stratégie d'optimisation des procédés d'assemblage et de fabrication dans le processus de réduction de poids du châssis d'un véhicule roadster -mémoire de maîtrise*, Université de Sherbrooke-Génie mécanique.

